



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Science

Bachelorarbeit

Möglichkeiten und Grenzen von Low-Cost-Sensoren
zur Überwachung der Außenluftqualität

Im Studiengang

Umwelttechnik (B.Sc.)

Vorgelegt von:

Jonas Meier



Erstgutachter: Prof. Dr. Carsten Frank

Zweitgutachter: M. Sc. Haris Sefo

Hamburg, 26.08.2021

Abstract

Luftverschmutzung stellt eine der größten Bedrohungen für die Umwelt und die menschliche Gesundheit dar. Die Überwachung von Luftqualität ist daher ein bedeutendes Element zur Risikobewertung. Konventionelle Überwachungsstationen sind teuer und aufgrund ihrer physischen Eigenschaften nur an bestimmten Orten einsatzfähig. Um die Lücke der spärlichen Überwachung zu füllen, geraten Low-Cost-Sensoren (LCS) immer mehr in den Fokus von Wissenschaft und Gesellschaft. Die vorliegende Literaturarbeit untersucht die aktuelle Überwachungsstrategie und fasst 1121 Datensätze aus 66 Publikationen zur Leistungsbewertung von LCS zusammen. Hierdurch sollen die Möglichkeiten und Grenzen von LCS im Hinblick auf die rechtlichen Gegebenheiten und auf die Datenqualität festgestellt werden. Es wurde erkannt, dass ein eindeutiges Potential besteht, LCS als unterstützende Überwachungsmethode einzusetzen. Allerdings muss die Datenqualität als wenig vertrauenswürdig eingestuft werden, wenn keine spezifischen Kalibriermethoden Anwendung finden. Als weitere wichtige Erkenntnis wurde die Bedeutsamkeit von einheitlichen Rahmenbedingungen zur Leistungsbewertung für LCS hervorgehoben.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Abstract | i |
| Symbolverzeichnis | ii |
| Abkürzungsverzeichnis | iv |
| Tabellenverzeichnis | vi |
| Abbildungsverzeichnis | vii |
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1. Problemstellung und Vorgehen | 1 |
| 1.2. Luftqualität | 2 |
| 2. Low-Cost-Sensoren zur Bestimmung der Außenluftqualität | 5 |
| 2.1. Definition und Merkmale | 5 |
| 2.2. Ausgewählte Low-Cost-Sensortechniken | 7 |
| 2.2.1. Elektrochemische Sensoren | 7 |
| 2.2.2. Metalloxid Sensoren | 9 |
| 2.2.3. Light-Scattering Feinstaubsensoren | 11 |
| 3. Aktuelle Bestimmung der Außenluftqualität anhand der 39. Bundesimmissions- | |
| schutzverordnung | 13 |
| 3.1. Rechtlicher Hintergrund | 13 |
| 3.2. Datenqualität | 13 |
| 3.3. Festlegung der Standorte | 14 |
| 3.4. Grenzwerte | 16 |
| 3.5. Art der Messstationen | 16 |
| 3.6. Referenzmessverfahren | 17 |
| 3.6.1. Feinstaub PM_{10} und PM_{25} – Gravimetrisches Messverfahren | 17 |
| 3.6.2. Ozon – Ultraviolett Photometrie | 18 |
| 3.6.3. Kohlenstoffmonoxid - NDIR-Photometrie | 19 |
| 3.6.4. Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid - Chemilumineszenz | 20 |
| 4. Untersuchung von Publikationen zur Leistungsevaluierung von Low-Cost- | |
| Sensoren | 23 |
| 4.1. Anforderungen an die Daten | 23 |
| 4.2. Quellen der Daten | 24 |
| 4.3. Zugrundeliegende Regressionsmetriken | 25 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.4. | Überblick gesamte Datenbank A | 26 |
| 4.5. | Datenbank A.1. | 32 |
| 4.5.1. | Feldevaluierung | 32 |
| 4.5.2. | Laborevaluierung | 35 |
| 4.6. | Datenbank A.2. | 37 |
| 5. | Analyse und Bewertung der Rechercheergebnisse | 41 |
| 5.1. | Messtechnische Ebene | 41 |
| 5.2. | Rechtliche Ebene | 49 |
| 5.2.1. | Kritische Beleuchtung der 39.BImSchV | 49 |
| 5.2.2. | Potential von LCS im Hinblick auf die 39.BImSchV | 50 |
| 5.3. | Grundsätzliche Rahmenbedingungen von Evaluierungen | 51 |
| 5.3.1. | Rolle von unterschiedlichen Regressionsmetriken | 52 |
| 5.3.2. | Evaluierungszeiträume und örtliche Gegebenheiten | 53 |
| 6. | Fazit und Ausblick | 56 |
| | Literatur | 70 |
| | Anhang | 71 |
| A. | Gesamte Datenbank A | 71 |
| B. | Datensätze der Boxplots | 92 |
| B.1. | Tabelle zu Abbildung 17 | 92 |
| B.2. | Tabelle zu Abbildung 18 | 98 |
| B.3. | Tabelle zu Abbildung 20 | 104 |

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

| | | |
|----------|--------------------|---|
| a | [-] | Regressionskonstante |
| b | [-] | Regressionskoeffizient |
| h | [Js] | Planksches Wirkungsquantum |
| I | [A] | elektrischer Strom |
| I_M | [A] | Messstrom |
| M | [-] | Stoßparameter |
| n | [-] | Anzahl der Messwerte |
| p | [Pa] | atmosphärischer Druck |
| p_a | [Pa] | Umgebungsdruck |
| R | [Ω] | elektrischer Widerstand |
| R^2 | [-] | Anpassungsgüte |
| R_{He} | [Ω] | Heizwiderstand |
| R_L | [Ω] | Lastwiderstand |
| R_s | [Ω] | Sensorwiderstand |
| RH | [%] | relative Luftfeuchtigkeit |
| $RMSE$ | [-] | Root Mean Square Error |
| SQE | [-] | Summe der Quadrate der erklärten Abweichungen |
| SQT | [-] | Summe der Quadrate der totalen Abweichungen |
| T | [K] | Temperatur |
| T_a | [K] | Umgebungstemperatur |
| U | [V] | elektrische Spannung |
| U_M | [V] | Messspannung |
| ν | [s ⁻¹] | Frequenz |

| | | |
|-----------|----------------------|-------------------|
| V_{dd} | [V] | Betriebsspannung |
| V_{He} | [V] | Heizspannung |
| V_{out} | [V] | Ausgangsspannung |
| X_G | [kg/m ³] | Gaskonzentration |
| y_{ref} | [kg/m ³] | Messwert Referenz |
| y_s | [kg/m ³] | Messwert LCS |

Griechische Symbole

| | | |
|------------|----------------------|---------------------------|
| σ_s | [S·m ⁻¹] | Leitfähigkeit des Sensors |
| α | [cm ⁻¹] | Absorptionskoeffizient |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------------------------|---|
| μC | Mikrocontroller |
| 2008/50/EG | Europäische Richtlinie über Luftqualität und saubere Luft in Europa |
| ADW | Analog-Digital-Wandler |
| ANN | Artificial Neural Network |
| AQ-SPEC | Air Quality Sensor Performance Evaluation Center |
| BImSchV | Bundesimmissionsschutzverordnung |
| BIP | Bruttoinlandsprodukt |
| BMU | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit |
| CA | California (Staatenkürzel) |
| CEN | Europäische Komitee für Normung |
| COST | European Cooperation in Science and Technology |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| EC | Elektrochemisch |
| ECS | Elektrochemische(r)-Sensor(en) |
| EGU | European Geoscience Union |
| EPA | Environmental Protection Agency (USA) |
| EU | Europäische Union |
| GAM | Generalized Additive Model |
| GF | Growth Factor |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IR | Infrarot |
| IQR | Interquartilbereich |
| JRC | Joint Research Center |
| LCS | Low-Cost-Sensor(en) (Umfasst OEMS und SSys) |

| | |
|---------------|--|
| LR | Lineare Regression (hier Kalibrierungsmodell) |
| LS | Light Scattering |
| LTE | Long Term Evolution (4. Mobilfunkgeneration) |
| MDPI | Multidisciplinary Digital Publishing Institute |
| Median | Median |
| MEP | Chinesisches Ministerium für Umweltschutz |
| ML | Machine Learning |
| MLR | Multiple Lineare Regression |
| MO | Metalloxid |
| MOS | Metalloxid-Sensor(en) |
| NDIRP | Nicht-Dispersive-Infrarot-Photometrie |
| OW | Oberer Whisker |
| OEMS | Original Equipment Manufacturer Sensor |
| OPV | Operationsverstärker |
| Q1 | 1. Quartil |
| Q3 | 3. Quartil |
| RF | Random Forest |
| SCAQMD | South Coast Air Quality Managment District |
| SLRM | Simple Linear Regression Model |
| SSys | Sensorsysteme |
| SVR | Support Vector Regression |
| UW | Unterer Whsiker |
| VCOs | Volatile Organic Compounds |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|----|--|----|
| 1. | Für diese Arbeit untersuchte Schadstoffe, deren Quellen, sowie Auswirkungen auf Gesundheit, Umwelt und Klima | 3 |
| 2. | Eigenschaften ausgewählter OEMS | 5 |
| 3. | Effekte von p- und n-dotierten Halbleitern auf die Leitfähigkeit | 10 |
| 4. | Datenqualitätsziele ausgewählter Schadstoffe bezogen auf die Beurteilungsvariante | 14 |
| 5. | Beurteilungsschwelle und Kategorisierung in Schutz der menschlichen Gesundheit und Schutz der Vegetation | 15 |
| 6. | Grenzwerte und entsprechende Mittelungszeiträume, sowie zulässige Überschreitungen von ausgewählten Schadstoffparametern | 16 |
| 7. | Gesamtübersicht der Laborevaluierungen | 37 |
| 8. | Vergleich von R^2 bezüglich Labor- und Feldevaluierungen identischer Sensoren | 46 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 2. | Beispiele für OEMS | 5 |
| 3. | Anwendungsschema von Low-Cost-Sensoren | 6 |
| 4. | Schema einer elektrochemischen Zelle | 8 |
| 5. | Schematischer Aufbau eines MOS | 9 |
| 6. | Messschaltung eines MOS | 10 |
| 7. | Relative Widerstandsänderung am Beispiel von CO | 11 |
| 8. | Das Innere der Messkammer des PPD42NS Feinstaubensors | 12 |
| 9. | Darstellung der Referenzmessapparatur zur Bestimmung von Feinstaub | 18 |
| 10. | Darstellung der Referenzmessapparatur zur Bestimmung von Ozon | 19 |
| 11. | Darstellung der Referenzmessapparatur zur Bestimmung von Kohlenstoffmonoxid | 20 |
| 12. | Darstellung der Referenzmessapparatur zur Bestimmung von Stickstoffdioxid | 22 |
| 13. | Anzahl der Datensätze und Publikationen, bezogen auf das Jahr der Veröffentlichung | 27 |
| 14. | Anzahl der Werte für R^2 bezogen auf Schadstoff, Sensortechnik, Regressionsmetrik und Mittelung | 28 |
| 15. | Anzahl der Datensätze und Publikationen gemäß der Aufteilung der gesamten Datenbank A in Datenbank A.1. und Datenbank A.2. | 30 |
| 16. | Ablaufschema der Untersuchung | 31 |
| 17. | Verteilung von R^2 bezogen auf die untersuchten Sensortechniken elektrochemisch (EC), laser scattering (LS) und metalloxid (MO) | 34 |
| 18. | Verteilung von R^2 bezogen auf die untersuchten Schadstoffparameter Kohlenstoffmonoxid (CO), Ozon (O_3), Stickstoffdioxid (NO_2) und Feinstaub (PM_{10} , PM_{25}) | 35 |
| 19. | Anzahl der Wertereihen bezogen auf die beobachteten Kalibrierungsmethoden | 38 |
| 20. | Verteilung von R^2 bezogen auf die in der Literatur am häufigsten angewendeten Kalibrierungsmodelle (RF und MLR) | 40 |
| 21. | Störgrößen von LCS-Messtechniken in Verbindung mit dem zu detektierenden Schadstoff, sowie die Lösung der Referenzmesstechnik | 48 |
| 22. | Anzahl der beobachteten Zeiträume | 54 |

1. Einleitung

1.1. Problemstellung und Vorgehen

Als eine der größten Herausforderungen unserer Zeit ist der Klimawandel Bestandteil zahlreicher Diskussionen auf politischer und gesellschaftlicher Ebene. In diesem Zusammenhang ist die Luftqualität ein wichtiger Indikator für die Gesundheit unseres Planeten. Neben den negativen Effekten von schlechter Luftqualität auf die Umwelt, sterben weltweit jährlich 4,2 Millionen Menschen an den Folgen von Luftverschmutzung. Sie ist somit für 11,6% aller Todesfälle verantwortlich [1]. Grund dafür sind zahlreiche Krankheitsbilder, die sich mit ihr verknüpfen lassen. Auf nahezu allen Kontinenten der Erde ist schlechte Luftqualität daher eine ernsthafte Bedrohung. Lewis und Edwards [2] geben an, dass 96% aller Menschen in Gegenden leben, in denen Schadstoffkonzentrationen erreicht werden, die gesundheitlich als kritisch angesehen werden können. Ebenso ergeben sich weltweit durch Luftverschmutzung wirtschaftliche Belastungen im Umfang von schätzungsweise 2-5% des weltweiten BIP [3]. Durch die fortschreitende Urbanisierung werden auch in Zukunft vor allem größere Städte von hohen Verschmutzungsgradienten betroffen sein.

Das Verständnis von Schadstoffexpositionen ist daher ein grundlegender Aspekt zur Einordnung der Bedrohungslage. Konventionelle Luftqualitätsüberwachungsstationen unterliegen strengen Kriterien bezüglich der Messtechnik, sowie Prüfung und Wartung der Geräte (s.a. Kapitel 3.6). Das Resultat dieser Bestimmungen sind zum einen technisch anspruchsvolle Messgeräte mit hoher Datenqualität, aber auch immense Kostenaufwendungen [4]. Dadurch können die Messstationen nur zur spärlichen Überwachung eingesetzt werden, da die Finanzierung mehrerer Systeme auf engem Raum nicht umsetzbar ist. Außerdem entspricht diese geringe räumliche Auflösung den nationalen Bestimmungskriterien. Zur hinreichenden Beurteilung von Umwelt- und Gesundheitsrisiken ist es jedoch unumgänglich die genauen Zusammensetzungen lokaler Luftverschmutzungsgradienten zu erfassen [5]. Nur so können gezielte Maßnahmen getroffen werden.

Um die Lücke der spärlichen Überwachung zu füllen, sind Low-Cost-Sensoren (LCS) zur Luftqualitätsbestimmung in den letzten Jahren ins Bewusstsein der Öffentlichkeit und Wissenschaft geraten. Sie zeichnen sich durch eine Vielzahl vorteilhafter Alleinstellungsmerkmale aus. Durch ihre geringe Größe und dem niedrigen Kostenaufwand ergeben sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Ein wesentlicher Nachteil ist allerdings ihre Empfindlichkeit gegenüber zahlreichen Störfaktoren, welche sich negativ auf die Datenqualität auswirken [5][4]. In der Vergangenheit wurden zahlreiche Leistungsbewertungen zu LCS publiziert. Diese Evaluierungen geben in der Regel kein Abbild bezüglich der Metaebene von LCS-Messtechniken, sondern beschreiben die individuelle Leistung einzelner Sensormodelle anhand von unterschiedlichen Regressionsmetriken, und auf der Grundlage verschiedener Umweltbedingungen (s.a. Kapitel 5.3).

Diese Literaturarbeit fasst 1121 Datensätze aus 66 Publikationen zur Leistungsbewertung von Low-Cost-Sensoren zusammen, und stellt somit ein umfassendes Bild der Evaluierung unterschiedlicher Modelle und Techniken dar. Hierbei wird sowohl auf verschiedene Arten der Kalibrierung, als auch auf die Bedeutsamkeit einheitlicher Evaluierungsvorgaben eingegangen (s.a. Kapitel 5.3). Durch die vorangestellte Untersuchung der aktuellen Luftqualitätsbestimmung, und der darin verankerten Referenzmessverfahren, werden gängige LC-Sensortechniken direkt mit konventionellen Messmethoden in Verbindung gebracht (s.a. Kapitel 5.1). Hierdurch wird die Grundlage geschaffen negative Einflussfaktoren besser zu verstehen und die Angaben zur Leistung einordnen zu können. Dieser Ansatz ist Teil der Analyse, die sich in eine messtechnische und rechtliche Ebene gliedert. Letztere nimmt Bezug zur 39. Bundesimmissionschutzverordnung (39.BImSchV), stellt deren unzureichende Aspekte im Hinblick auf die Überwachungsstrategie vor und untersucht welche Rolle LCS diesbezüglich einnehmen könnten. Diese Interpretation erfolgt ebenfalls anhand der zusammengetragenen wissenschaftlichen Publikationen.

Ziel der Arbeit ist es, die zu evaluierende Forschungsfrage der Möglichkeiten und Grenzen für Low-Cost-Sensoren zur Luftqualitätsüberwachung zu beantworten. Dies erfolgt durch die Analyse und Kritik der gewonnen Erkenntnisse aus den einzelnen Untersuchungen.

1.2. Luftqualität

Luftqualität (a.g. Luftgüte) ist ein Indikator zur Beschaffenheit und dem Anteil an enthaltenen Luftverunreinigungen in der Umgebungsluft. Unter Luftverunreinigung wird die Gesamtheit verschiedener Feststoffe und Gase verstanden, die eine potenzielle Bedrohung für Menschen, sowie der Tier- und Pflanzenwelt darstellen. Weiterhin wird ihnen eine besondere Wirkung in der Veränderung des globalen Klimas zugeschrieben. Luftverschmutzung und damit Luftqualität ist ein komplexes Gemisch aus vielen verschiedenen chemischen Komponenten [6]. Durch meteorologische Einflüsse wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wind verändern sich ihre thermodynamischen Eigenschaften und Zusammensetzungen [7]. Die Feststoffe und Gase von Luftverunreinigung lassen sich in verschiedene Schadstoffe klassifizieren.

Diese Arbeit stellt Messtechniken vor, die zur Bestimmung von vier ausgewählten Schadstoffen genutzt werden können. Sie sind in der 39.BImSchV verankert und wurden aufgrund ihrer tiefgreifenden Auswirkungen auf die Gesundheit und die Umwelt ausgewählt. Tabelle 1 gibt detaillierte Informationen über diese Parameter. Es zeichnet sich ab, dass die Emissionen aller Schadstoffe direkt oder indirekt durch menschliches Handeln befördert werden, oder als sekundäre Schadstoffe auftreten (O_3) [6].

Tabelle 1: Für diese Arbeit untersuchte Schadstoffe, deren Quellen, sowie Auswirkungen auf Gesundheit, Umwelt und Klima [6]

| Schadstoff | Quellen | Gesundheitliche Auswirkungen | Umwelt- und Klimaauswirkungen |
|--|--|--|--|
| Ozon (O_3) - farbloser, sekundärer Schadstoff, welcher nur in hohen Konzentrationen von Menschen gerochen werden kann | Entsteht aus der Reaktion mit Stickstoffdioxid oder flüchtigen organischen Verbindungen (VCOs) in Kombination mit Sonnenlicht. Die Reaktion wird also durch starke Sonneneinstrahlung und hohe Temperaturen befördert. | Durch das Einatmen von Ozon können im menschlichen Körper Schmerzen in der Brust, Husten, Reizung und Verstopfung ausgelöst werden. Weiterhin können Auswirkungen auf die Lungenfunktion auftreten (Vernarbung des Lungengewebes), Asthma herbeigeführt oder verschlimmert werden, und Bronchitis sowie Emphyse auftreten. | Durch Ozon kommt es zum Rückgang der Vegetation, da es die Blattstruktur beschädigt. Dadurch wird die Fortpflanzung und das Wachstum der Tier- und Pflanzenwelt gestört. Langfristig wird die Biodiversität beeinträchtigt. Ozon, als bekanntes Treibhausgas, trägt maßgeblich zur Erwärmung der Atmosphäre bei. |
| Feinstaub (hier $PM_{2,5}$ und PM_{10}) - Teilchen, welche aufgrund ihres diametrischen Durchmessers klassifiziert werden. Der Index 10 steht beispielsweise für die Partikelfraktion, welche kleiner ist als $10\mu\text{m}$ | Unterscheidung in primärer und sekundärer Feinstaub. Ersterer bezeichnet den direkt aus der Emissionsquelle stammenden Feinstaub durch Verbrennungsprozesse, Reifenabrieb, Pollen oder Schüttgut. Sekundärer Feinstaub entsteht durch chemische Reaktionen in der Atmosphäre. Eine der größten Quellen für Feinstaub ist die Landwirtschaft. Natürliche Quellen sind beispielsweise Waldbrände oder Vulkanausbrüche. | Feinstaubpartikel gelangen abhängig von ihrer Größe tief in den Organismus von Menschen und Tieren. Ein Großteil der Partikel sind als krebserregend eingestuft. Weiterhin verursachen sie Asthma, Allergien, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Beschwerden in der Lunge. | Feinstaub ist vor allem in Form von Smog in der Umwelt sichtbar. Viele Feinstaubpartikel in der Atmosphäre reflektieren das Sonnenlicht, was im geringen Maße zu einer Abkühlung führt. Da die Staubpartikel aus den unterschiedlichsten Zusammensetzungen bestehen, absorbieren einige von ihnen auch Sonnenlicht. Dies führt wiederum zu Erderwärmung. |

| Schadstoff | Quellen | Gesundheitliche Auswirkungen | Aus- | Umwelt- und Klima- auswirkungen |
|--|---|--|------|---|
| Stickstoffdioxid (NO_2) - bräunlich, rötliches, giftiges Gas mit beißendem Geruch. | Entsteht bei exothermen Reaktionen mit atmosphärischen Stickstoff. Ist ein Nebenprodukt von Verbrennungen unterschiedlichster Brennmaterialien. Hohe Konzentrationen sind in Industriegebieten und stark befahrenen Straßen zu erwarten. Im Haushalt entsteht NO_2 durch Gasherde und offene Kamine, sowie Zigarettenrauch. | Stickstoffdioxid kann tief in die Lunge eindringen und bewirkt dort als Reizgas Entzündungen an den Schleimhäuten. Über das Blut können sich weitere Entzündungen im Organismus ausbreiten. NO_2 trägt somit maßgeblich zur Erhöhung von Atemwegsproblemen bei und verschlimmert bei Asthmatikern die Symptome. | | Führt zur Versauerung und Nährstoffanreicherung in Boden und Oberflächengewässer (Eutrophierung), wodurch es zu Veränderungen der Biodiversität kommt. Trägt zur Bildung von Ozon und Methan bei. |
| Kohlenstoffmonoxid (CO) - farblos, geruchlos, giftiges Gas | Ergibt sich bei der unterstöchiometrischen Verbrennung von Erdgas, Kohle und weiteren Brennstoffen. Eine der größten Emissionsquellen stellt der Kraftfahrzeugverkehr da. | Durch das Einatmen von Kohlenstoffdioxid werden die Organe und das Gewebe von Menschen und Tieren nicht mit der erforderlichen Sauerstoffmenge versorgt. Aufgrund der toxischen Auswirkungen auf das zentrale Nervensystem kommt es bei erhöhter CO-Konzentration zu Übelkeit, Schwindel und Kopfschmerzen. Vergiftungen mit Kohlenstoffmonoxid können zum Tod führen. | | Trägt zur Erzeugung von CO_2 , O_3 und weiteren Treibhausgasen bei, welche die Erderwärmung fördern. |

2. Low-Cost-Sensoren zur Bestimmung der Außenluftqualität

2.1. Definition und Merkmale

Wie sich aus dem Namen ableiten lässt, versteht man unter einem Low-Cost-Sensor einen kostengünstigen Messaufnehmer. Im Kontext der Luftqualitätsüberwachung ist mit kostengünstig vor allem der Bezug zu üblichen Referenzmesssystem gemeint. Weiterhin steht in der Literatur der Begriff Low-Cost-Sensor (LCS) für einen einzelnen Messaufnehmer (OEMS engl. für original equipment manufacturers sensor), und für Sensorsysteme (SSys) [8].

Unter OEMS wird in dieser Arbeit ein Bauteil verstanden, das durch eines der in Kapitel 2.2 vorgestellten Messverfahren Gase oder Partikel in der Außenluft bestimmt und durch entsprechende Kalibriermethoden die Konzentration der Gase oder Partikel als Messwert ausgibt. Neben den bereits angesprochenen geringen Kosten, besitzen OEMS weitere vorteilhafte Alleinstellungsmerkmale. Wie Tabelle 2 entnommen werden kann, sind sie sehr klein und zeichnen sich durch ein geringes Gewicht aus. Außerdem benötigen sie nur sehr wenig elektrische Energie [9][10][11]. In Abbildung 2 sind die Sensoren der Tabelle dargestellt.

Tabelle 2: Eigenschaften ausgewählter OEMS. Schadstoff, Gewicht und Abmessungen sind den entsprechenden Datenblättern entnommen: SDS011 [9], MQ-131 [10], B43F [11]

| OEM Modell | SDS011 (Nova Fitness) | MQ-131 (Winsen) | B43F (Alphasense) |
|---------------------------|-----------------------|-----------------|-------------------|
| Schadstoff | PM_{25} | O_3 | NO_2 |
| Preis ¹ in € | ~25 | ~18 | ~140 |
| Gewicht in g | ~50 | ~5 | ~13 |
| Abmessungen (LxBxH) in mm | 71x70x23 | 32x22x30 | 32x27x16 |



Abbildung 2: Beispiele für OEMS v.l.n.r.: NO2-B4 (Alphasense) [11], SDS011 (Nova Fitness) [9], MQ131 (Winsen) [10]

Den größten Nutzen eines OEMS erhält man, wenn einzelne OEMS in einem SSys zusammengeführt werden. Im weiteren Verlauf wird unter einem SSys eine Messeinrichtung verstanden,

¹Preise sind starken Schwankungen unterzogen. Angaben aus diversen Quellen.

welche mindestens zwei OEMS enthält, oder einen OEMS in Kombination mit einem Messaufnehmer zur Bestimmung atmosphärischer Parameter wie Druck (p), Temperatur (T) oder relative Luftfeuchtigkeit (RH). Zusätzlich können Sensoren zur Bestimmung der Windrichtung und Windgeschwindigkeit zur Anwendung kommen. Die Kosten dieser abgeschlossenen SSysteme erreichen mehrere hundert bis tausend Euro [12][13]. Aus Abbildung 3 ist zu entnehmen, dass SSysteme, neben den sensitiven Elementen zur Bestimmung der einzelnen Parameter in der Umgebungsluft, weitere Hardware besitzen. Die abgebildeten Komponenten werden zur Stromversorgung (Batterien oder Netzteil), Signalverstärkung (Operationsverstärker Abk. OPV), Umwandlung der analogen Werte in digitale (Analog-Digital-Wandler Abk. ADW), und Verknüpfung der einzelnen Hardware (Mikroprozessoren Abk. μC) genutzt. Weiterhin werden Gehäuse zur Abschirmung von meteorologischen Einflüssen und Module für die Telekommunikation verbaut. Durch letztere werden die Messdaten über Cloudanwendungen in Datenbanken gespeichert, um dann durch den Nutzer analysiert werden zu können. Die Abmessungen und das Gewicht von SSystemen variieren entsprechend den verbauten Komponenten. Vajs et al. [14] geben für SSysteme eine Richtwert bezüglich der Dimensionen von $180 \times 180 \times 256 \text{ mm}^3$ an, das Gewicht beschränkt sich auf 1,5kg und die elektrische Leistung liegt bei 2,5W.

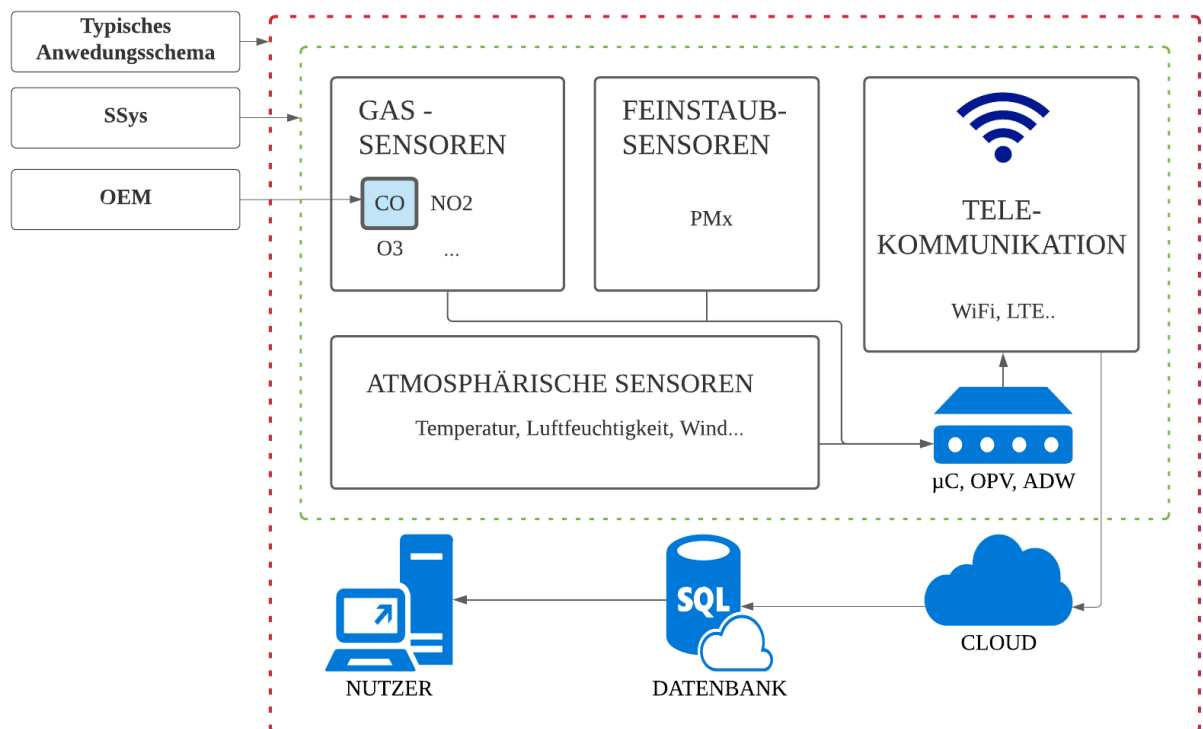


Abbildung 3: Anwendungsschema von Low-Cost-Sensoren (Eigene Darstellung)

Die Kalibrierung von OEMS oder SSys ist ein wichtiger Bestandteil des Anwendungsfeldes von LCS. Unter Kalibrierung lässt sich der Übergang des Rohwertes eines OEMS in den tatsächlichen Konzentrationswert des entsprechenden Schadstoffs verstehen. Der Rohwert eines Sensors ist ein Strom- oder Spannungswert. Dieser Wert hängt unter Umständen proportional mit der Schadstoffkonzentration zusammen (s.a. Kapitel 2.2.1), und kann somit durch einfache lineare Gleichungen überführt werden. Im Falle von Metalloxid-Sensoren finden komplexere Gleichungen Anwendung, da der Sensorausgang keine Proportionalität mit der Konzentration aufweist (s.a. Kapitel 2.2.2). Viele OEMS, und in der Regel alle SSys, sind bereits einer Werkskalibrierung unterzogen und können somit direkt vom Nutzer eingesetzt werden. Zusätzlich kommen Kalibrierungen in Form von Machine Learning (ML) Modellen, immer öfter zur Anwendung. Im weiteren Verlauf wird diese Art von Kalibrierung als fortgeschrittene Kalibrierung bezeichnet. Da dieses Kapitel nur die grundsätzliche Merkmale von LCS vorstellen soll, wird in Kapitel 4 und 5 näher auf die Rolle unterschiedlicher Kalibriermethoden eingegangen.

2.2. Ausgewählte Low-Cost-Sensortechniken

Im weiteren Verlauf werden ausschließlich die Techniken beschrieben, mit denen die unter Kapitel 4 dargestellten Messdaten erzeugt wurden. Hierdurch sollen die Grundlagen geschaffen werden, um in der Diskussion näher auf die Problematiken von LCS eingehen zu können. Wie bei den Referenzmessverfahren besteht ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der Sensoren bei der Partikelkonzentrationsbestimmung und der Gaskonzentrationsbestimmung. Bis auf die Partikelkonzentrationsbestimmung ist keine der nachstehenden Techniken schadstoffspezifisch. Beispielsweise können elektrochemische Sensoren sowohl zur Bestimmung von O_3 , als auch CO herangezogen werden. Gleiches gilt für Metalloxid-Sensoren. Welcher Schadstoff bestimmt wird, hängt von der technischen Konzipierung des Sensors ab.

2.2.1. Elektrochemische Sensoren

Henring und Schönfelder [15] klassifizieren Elektrochemische (EC) Sensoren in potenziometrisch, amperometrisch, konduktometrisch bzw. impedimetrisch und biosensorik. Im Folgenden wird unter einem EC-Sensor ein Messaufnehmer verstanden, welcher der Amperometrie zuzuordnen ist und in seiner einfachsten Form aus zwei Metallelektroden, einer Diffusionsbarriere, einem Flüssigkeitselektrolyten und der Messschaltung besteht. In Abbildung 4 ist der typische Aufbau eines EC-Sensors (ECS) dargestellt. Wie man der Abbildung entnehmen kann, sind die Elektroden, welche häufig aus Gold oder Platin bestehen, in den Elektrolyten eingebettet. Da der Elektrolyt aus einer Flüssigkeit besteht, schützt ihn die Diffusionsbarriere, zusammen mit dem äußeren Rand des Sensors, vor dem Auslaufen.

Das zu detektierende Gas dagegen ist in der Lage durch die Membran zu diffundieren. So gelangt es zur Messelektrode, die es ebenfalls durchströmt. Es kommt zu einer chemischen Reak-

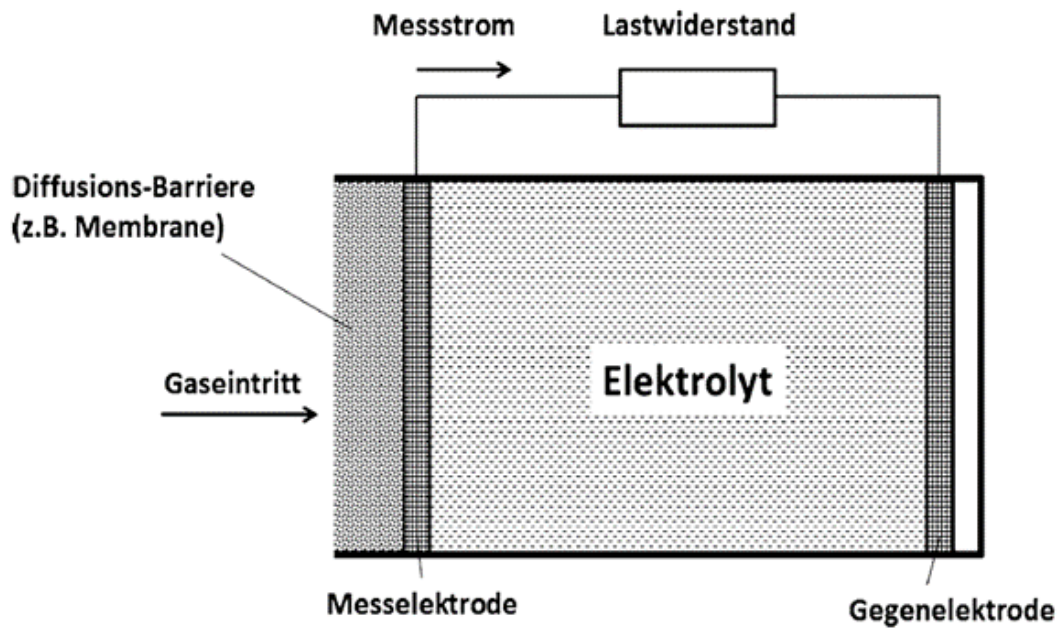
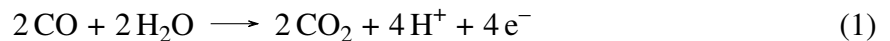


Abbildung 4: Schema einer elektrochemischen Zelle [16]

tion, bei der im Folgenden Kohlenstoffmonoxid als Beispiel dient. Die Reaktion führt bei allen reduzierenden Gasen zur Abgabe von Elektronen (siehe Gleichung 1) [16].



Im angelegten Stromkreis kommt es dadurch zu einem sehr kleinen Stromfluss I_m . An der Gegenelektrode werden die Elektronen, und die an der Messelektrode entstandenen Kationen mit dem in der Umgebungsluft vorhandenen Sauerstoff zu Wasser umgesetzt (Gleichung 2) [16].



Aus Gleichung 1 ist ersichtlich, dass für jedes CO-Molekül jeweils 2 Elektronen für den Stromfluss zur Verfügung stehen. Hieraus lässt sich ableiten, dass sich der Messstrom I_m proportional mit der Gaskonzentration ändert. Der Spannungsabfall über R_L wird mit U_M bezeichnet und lässt sich durch Gleichung 3 folgendermaßen darstellen [16].

$$U_M = I_m * R_L \quad (3)$$

2.2.2. Metalloxid Sensoren

Bereits vor mehreren Dekaden wurde der Effekt der Verringerung, bzw. Erhöhung der Leitfähigkeit durch reduzierende oder oxidierende Gase bei Metalloxiden (MO) festgestellt. Dieses chemische Interaktion machen sich MO-Sensoren (MOS) zu nutze. Der schematische Aufbau eines solchen Sensors wird in Abbildung 5 dargestellt. Die gassensitive Schicht besteht aus unterschiedlichen p- oder n-dotierten Halbleitermaterialien. Häufig zum Einsatz kommen: Zinnoxid (SnO_2), Zinkoxid (ZnO), Titandioxid (TiO_2) (alle n-dotiert) oder Nickeloxid (NiO), Kupferoxid (Cu_2O) (beide p-dotiert). Ein wichtiges sensorteknisches Merkmal von MOS ist ihr Heizelement. Hierdurch wird der Halbleiter auf seine Betriebstemperatur (300-450°C) gebracht [16].

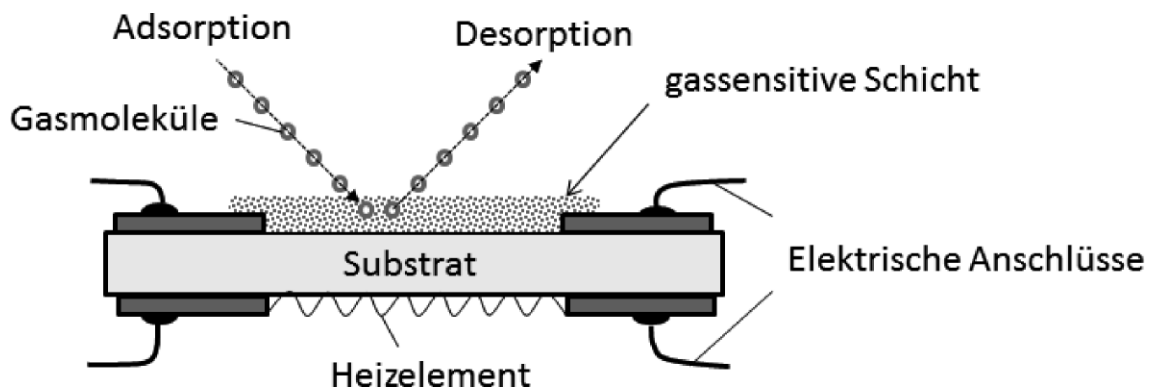


Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines MOS [16]

Konkret wird das Wirkprinzip im Folgenden anhand des Beispiels einer n-dotierten ZnO -Halbleiterschicht durch die Anwesenheit von CO beschrieben. Im ersten Schritt kommt es zu einer Adsorption des Sauerstoffs aus der Umgebungsluft. Die Adsorptionsplätze liegen bezüglich des Fermi-niveaus in einem energetisch niedrigeren Bereich. Daher kommt es zur Chemisorption, dem Elektronenübergang von der gassensitiven Schicht des Halbleiters, auf den Sauerstoff der Umgebungsluft. Dieser Vorgang kann nur durch das bereits angesprochene hohe Temperaturniveau ablaufen. Abhängig von der Temperatur entsteht negativ geladener Sauerstoff mit unterschiedlichen Oxidationszahlen (O^{-2} , O^- , O_2^-). Aus dem Elektronentransfer folgt eine Verringerung an Majoritätsträgern. Die Leitfähigkeit sinkt. Durch die Anwesenheit eines reduzierenden Gases (CO), entsteht durch die Reaktion mit dem negativ geladenen Sauerstoff Kohlenstoffdioxid (CO_2). Das CO_2 -Molekül liegt in einem höheren energetischen Bereich als das Fermi-niveau. Folgerichtig werden Elektronen an den Metalloxidhalbleiter abgegeben. Die Leitfähigkeit wird erhöht. Anschließend desorbiert das CO_2 und der freie Adsorptionsplatz steht wieder für ein Sauerstoffmolekül zur Verfügung. Für p-dotierte Halbleiter, welche zur Konzentrationsbestimmung von reduzierenden Gasen verwendet werden, läuft dieser Vorgang gegenteilig ab. Tabelle 3 soll den Zusammenhang verdeutlichen [17][16].

Tabelle 3: Effekte von p- und n-dotierten Halbleitern auf die Leitfähigkeit nach [17]

| | reduzierendes Gas | oxidierendes Gas |
|-----------|--------------------------|--------------------------|
| p-dotiert | Leitfähigkeitsverringern | Leitfähigkeitserhöhung |
| n-dotiert | Leitfähigkeitserhöhung | Leitfähigkeitsverringern |

An den elektrischen Anschlüssen (siehe Abbildung 5) wird der Metalloxid-Gassensor in eine Messschaltung integriert. Hierfür soll Abbildung 6 als Beispiel dienen. Die Leitfähigkeitsänderung $\Delta\sigma_s$ des Sensors, als Maß der Konzentrationsänderung des Gases ΔX_G wird im Widerstand R_s ausgedrückt [17].

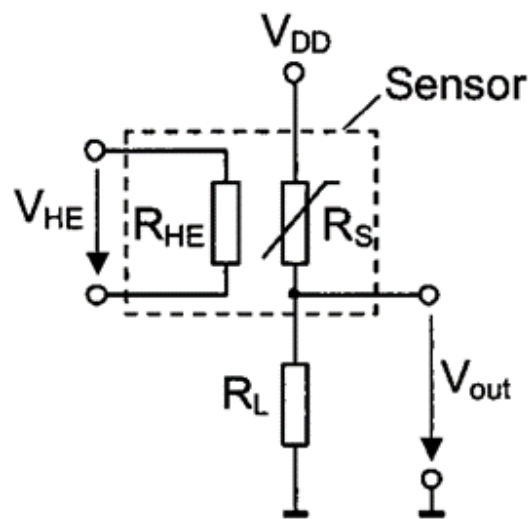


Abbildung 6: Messschaltung eines MOS [17]

Durch die Heizspannung V_{He} wird der Heizwiderstand R_{He} versorgt. Die konstante Betriebsspannung wird durch V_{dd} gekennzeichnet. Für V_{out} am Lastwiderstand R_L gilt gemäß Gleichung 4 folgender Zusammenhang [16]:

$$V_{out} = \frac{V_{dd}}{R_s/R_L + 1} \quad (4)$$

In der Praxis wird aufgrund der nicht identischen Eigenschaften von Sensoren des gleichen Typs die relative Änderung $\Delta R_s/R_o$ beschrieben. Dabei gilt für R_o , $X_G = 0$. Abbildung 7 zeigt die relative Änderung beispielhaft für CO [17].

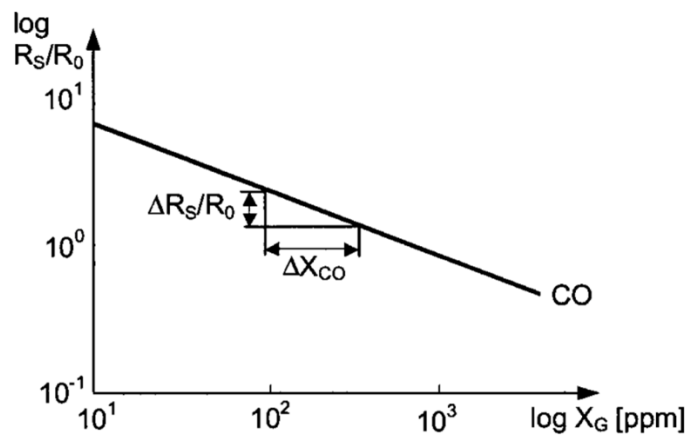


Abbildung 7: Relative Widerstandsänderung am Beispiel von CO [17]

2.2.3. Light-Scattering Feinstaubsensoren

Die Bestimmung der Feinstaubkonzentration durch OEMS erfolgt durch Messaufnehmer, die die Lichtstreuung (engl. Light Scattering Abk. LS) an den Partikeln messen, welche die Messeinrichtung durchströmen. Zur Bestrahlung der Partikel wird typischerweise eine LED als Lichtquelle eingesetzt. Auf der gegenüberliegenden Seite wird die reflektierte Strahlung von einer Photodiode aufgenommen. Dieses Verfahren lässt sich auch als optische Partikelzählung beschreiben, bei der die Größe und Anzahl identischer Partikel detektiert werden.

In Abbildung 8 ist das Innere der Messkammer des PPD24ND-Feinstaubensors abgebildet. Er soll im Folgenden als Beispiel für das Prinzip der LS-Messtechnik dienen. Die Infrarot-LED auf der rechten Seite bestrahlt die durch den Sensor strömenden Partikel. Zwischen dem Ein- und Auslass der Sensorkammer kommt es, durch die Wärmeabgabe des elektrischen Widerstandes, zu einem geringen Temperaturunterschied, der den Volumenstrom fördert. Durch die Linse detektiert die Fotodiode das von den Feinstaubpartikeln beeinflusste Licht der LED, das durch die Blende auf einen engen Bereich konzentriert wird. Kommt es zu einer hohen Anzahl an Partikel in der Messkammer, werden von der Diode weniger Lichtwellen aufgenommen. Dies macht sich im Sperrstrom der Fotodiode bemerkbar, der proportional mit der aufgenommenen Lichtintensität zusammenhängt. Durch die integrierte Messschaltung wird der erzeugte Sperrstrom in einen Spannungsimpuls überführt. Dieser wird hinsichtlich seiner Höhe gemessen. Mit einer Abtastzeit von 30 Sekunden erfolgt die Überführung in das sogenannte *pulse occupancy ratio*. Dieser Wert gibt die Anzahl der durch die Messkammer strömenden Partikel an. Da die Überführung der Lichtstreuung von Feinstaubpartikeln in deren Massenkonzentrationen Teil von integrierten Berechnungsformeln der Hersteller ist, kann an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen werden [18].

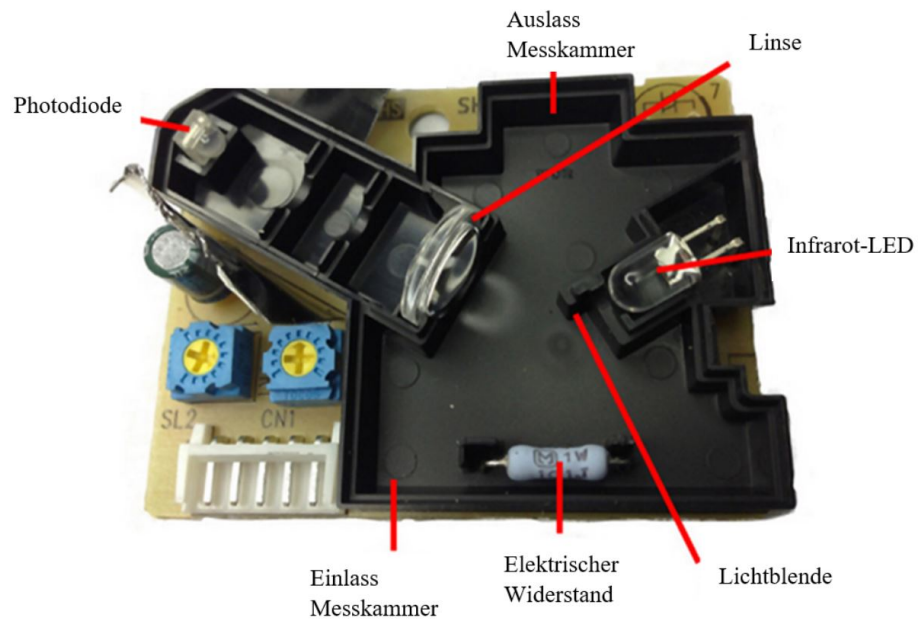


Abbildung 8: Das Innere der Messkammer des PPD42NS Feinstaubsenors [18] (Bezeichnungen übersetzt)

3. Aktuelle Bestimmung der Außenluftqualität anhand der 39. Bundesimmissionsschutzverordnung

Im Folgenden wird sich ausschließlich auf die europäische Luftqualitätsrichtlinie und die sich daraus ergebene 39.BImSchV bezogen, wenngleich in anderen Ländern der Welt Institutionen wie die US Environmental Protection Agency (EPA) oder das chinesische Ministerium für Umweltschutz (MEP) ähnliche Richtlinien herausgeben [19].

3.1. Rechtlicher Hintergrund

Zum Vergleich von Luftqualitätsmesswerten werden in Europa Messdaten einheitlich erhoben. Die Datenerfassung erfolgt gemäß der EU-Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa (i.F. 2008/50/EG). Sie ist am 11. Juni 2008 in Kraft getreten und wurde zuletzt 2015 (2015/1480/EG) geändert. Durch sie verpflichten sich alle Mitgliedstaaten der europäischen Union (EU) den Kriterien zur Festlegung der Gebiete, der Berichterstattung, der Datenqualität und den vorgeschriebenen Messverfahren nachzukommen [20]. Aktuell laufen rechtliche Prozesse gegen Deutschland und weitere Mitgliedstaaten aufgrund der Grenzwertüberschreitung von Stickstoffdioxid [21]. All diese Verfahren lassen sich auf die zugrundeliegende Richtlinie zurückführen.

Gemäß den Rechtsakten der EU müssen Richtlinien in nationales Recht umgesetzt werden, um in den Mitgliedsländern geltend gemacht zu werden. Aus der europäischen Luftqualitätsrichtlinie ist in Deutschland die 39. BImSchV hervorgegangen. Diese Umsetzung erfolgte unverändert [22], weshalb im Folgenden ausschließlich die 39.BImSchV Erwähnung findet. Als Ergebnis dieser Verordnung befinden sich im gesamten Bundesgebiet mehr als 500 Messstationen [23]. Die Verantwortung zum Betrieb der Stationen liegt bei den Bundesländern. Deren Berichte werden über das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) an die europäische Kommission weitergeleitet. Das BMU ist ebenso für die Überprüfung der im Folgenden näher beschriebenen Standortauswahl zuständig [24].

3.2. Datenqualität

Die 39.BImSchV unterteilt die Verfahren zur Bestimmung der Luftqualität in vier verschiedene Varianten: *Ortsfeste Messungen*, *Orientierende Messungen*, *Modellrechnungen* und *Objektive Schätzungen*. Wie sich aus Tabelle 4 entnehmen lässt, erfolgt gemäß dieser Reihenfolge die Abstufung der Datenqualität. Für einen besseren Überblick bezieht sich der Auszug nur auf die in dieser Arbeit untersuchten Schadstoffe.

Die Angaben der Prozentsätze beziehen sich auf Einzelmessungen, welche über den betreffen-

Tabelle 4: Datenqualitätsziele ausgewählter Schadstoffe bezogen auf die Beurteilungsvariante (Anlage 1A 39.BImSchV)

| Beurteilungsvariante | Stickstoffdioxid, Kohlenstoffmon- oxid | Feinstaub (PM_{25}, PM_{10}) | Ozon |
|---|--|-------------------------------------|------------------------------|
| Ortsfeste Messungen | | | |
| Unsicherheit | 15% | 25% | 15% |
| Mindestdatenerfassung | 90% | 90% | 90% (Sommer) 75% (Winter) |
| Orientierende Messungen | | | |
| Unsicherheit | 25% | 50% | 30% |
| Mindestdatenerfassung | 90% | 90% | 90% |
| Mindestmessdauer | 14% | 14% | >10% |
| Unsicherheit der Modellrechnungen stündlich | 50% | n.a. | 50% |
| Objektive Schätzung Unsicherheit | 75% | 100% | 75% |

den Zeitraum gemittelt werden. Für die Unsicherheit von Modellrechnungen gilt die maximale Abweichung der gemessen und berechneten Werte. Das Gleiche gilt für die Unsicherheit von objektiven Schätzungen. Für nähere Informationen bezüglich der Berechnungen von Unsicherheiten sei an dieser Stelle auf die entsprechenden DIN-Normen und CEN-Leitfaden verwiesen. Sie sind den Anmerkungen in Anlage 1A Abs.1-2 BImSchV zu entnehmen. Die Mindestdatenerfassung bezieht sich auf den Zeitraum in dem die Messungen erhoben werden. Für 75% und 1h Datenerfassung wäre der erforderliche Anteil gültiger Daten beispielsweise 45 Minuten. Mit einer Mindestmessdauer von 14% für orientierende Messungen wird eine Stichprobe pro Woche vorausgesetzt ($52/365 \cdot 100\% \approx 14\%$) (Anlage 1A 39.BImSchV).

3.3. Festlegung der Standorte

Die Festlegung, welche der oben erwähnten Varianten Verwendung findet, ergibt sich aus der sogenannten Beurteilungsschwelle. Sie wird in obere und untere Beurteilungsschwelle gegliedert und in die zwei Kategorien *Schutz der menschlichen Gesundheit* und *Schutz der Vegetation* geteilt. Tabelle 5 verdeutlicht den Zusammenhang. Die Beurteilungsschwellen werden bei einem bestimmten prozentualen Anteil des Immissionsgrenzwertes unter- bzw. überschritten.

Tabelle 5: Beurteilungsschwelle und Kategorisierung in Schutz der menschlichen Gesundheit und Schutz der Vegetation (Anlage 2A 39.BImSchV)

| Beurteilungsschwelle | Schutz der menschlichen Gesundheit | Schutz der Vegetation |
|----------------------|---|---|
| Obere Schwelle | 60% des Vierundzwanzigstunden-Immissionsgrenzwerts ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dürfen nicht öfter als dreimal im Kalenderjahr überschritten werden) | 60 % des kritischen Wertes; Winter: $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| Untere Schwelle | 40% des Vierundzwanzigstunden-Immissionsgrenzwerts ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dürfen nicht öfter als dreimal im Kalenderjahr überschritten werden) | 40 % des kritischen Wertes; Winter: $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ |

Kommt es zu einem überschreiten der oberen Beurteilungsschwelle müssen ortsfeste Messungen durchgeführt werden (§13 Abs.2 39.BImSchV). Befindet sich die Konzentration innerhalb der oberen und unteren Beurteilungsschwelle können ortsfeste Messungen in Kombination mit orientierenden Messungen angewendet werden (§13 Abs.3 39.BImSchV). Ist die Konzentrationsbestimmung kleiner als die untere Beurteilungsschwelle sind nur Modellrechnungen und Methoden der objektiven Schätzung vorgeschrieben. Eine Beurteilungsschwelle gilt als überschritten, wenn sie in den vorangegangenen fünf Jahren in mindestens drei einzelnen Kalenderjahren überschritten worden ist (§13 Abs.4 39.BImSchV).

Die Bestimmung der Orte erfolgt nach einem festgelegten Verfahren, in dem die Hoheitsgebiete der europäischen Union in Ballungsräume (gemäß Richtlinie Städte mit mehr als 250.000 Einwohnern) und sonstige Beurteilungsgebiete unterteilt werden. Aus der Kombination von Überschreitung bzw. Unterschreitung der Beurteilungsschwelle sowie der Anzahl der Bevölkerung im festgelegten Gebiet, wird die Summe der Messstationen vorgegeben. Für einen Ballungsraum mit einer Bevölkerungsanzahl von 1 Mio. – 1,5 Mio. Menschen, in dem die obere Beurteilungsschwelle überschritten wird, wäre die erforderliche Mindestanzahl an ortsfesten Messstationen 4 (für alle Schadstoffe außer Feinstaub) plus 6 (Feinstaub, Summe aus PM_{10} u. PM_{25}) (Anlage 5 A. 39.BImSchV). Eine ortsfeste Messstation besteht in der Regel aus einer Kombination von mehreren Messsystemen, sodass an einem Ort mehrere Schadstoffe detektiert werden. Die Kosten dieser Systeme, welche die in Kapitel 3.6 beschriebenen Verfahren nutzen, betragen bis zu 30.000€ [4]. Für die Gesamtkosten einer Station, ohne Wartung und Kontrolle der Gerätschaften, ergeben sich somit in Summe über 100.000€. Concas et al. [25] geben die Kosten für komplette Systeme sogar mit bis zu über eine Million Dollar an.

3.4. Grenzwerte

Eine der wichtigsten Punkte im Hinblick auf Maßnahmen und Verpflichtungen gegenüber der europäischen Union sind die in der 39.BImSchV verankerten Grenzwerte. Tabelle 6 zeigt die Grenzwerte (Spalte *Konzentration*), den Mittelungszeitraum und die zulässigen Überschreitungen pro Jahr der ausgewählten Schadstoffe dieser Arbeit. Für Ozon ist die Konzentration als Zielwert festgelegt.

Tabelle 6: Grenzwerte und entsprechende Mittelungszeiträume, sowie zulässige Überschreitungen von ausgewählten Schadstoffparametern (§§3-5,8,9 39.BImSchV)

| Schadstoff | Konzentration | Mittelungszeitraum | Zulässige Überschreitungen pro Jahr |
|-----------------------------|---|--------------------|--|
| Feinstaub (PM_{25}) | 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 1 Jahr | n/a |
| Feinstaub (PM_{10}) | 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 24h | 35 |
| Feinstaub (PM_{10}) | 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 1 Jahr | n/a |
| Kohlenstoffmonoxid (CO) | 10 mg/m^3 | 8h | n/a |
| Stickstoffdioxid (NO_2) | 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 1 Jahr | n/a |
| Stickstoffdioxid (NO_2) | 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 1h | 18 |
| Ozon (O_3) | 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Informationsschwelle) | 1h | n/a |
| Ozon (O_3) | 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Zielwert) | 8h | An 25 Tagen über einen Zeitraum von 3 Jahren |

3.5. Art der Messstationen

Weitere Vorschriften zu den Messstationen ergeben sich aus den Standortbestimmungen. In ihnen ist geregelt welche Faktoren bei der Installierung der Messsysteme berücksichtigt werden müssen, und um welche Art von Messstation es sich handelt. Man unterteilt diese Bestimmungen in klein- und großräumige Standortbestimmungen.

Kleinräumige Standortbestimmung

Beschreibt grundlegende Aspekte: Winkel der Luftströmung vor dem Sensoreinlass, Befreiung der Messeinrichtung von Störfaktoren (Bäume, Gebäude etc.), Messeinlass 1,5m – 4m über dem Boden, nicht in nächster Nähe von Emissionsquellen. Weiterhin werden Hinweise auf Störquellen gegeben und nahegelegt, dass die Sichtbarkeit der Messstation in der Umgebung berücksichtigt werden soll, sowie die Sicherheit der Öffentlichkeit und des Betriebspersonals.

Großräumige Standortbestimmung

Dieser Teil der Standortbestimmung wird in *Schutz der menschlichen Gesundheit* und *Schutz der Vegetation und der natürlichen Ökosysteme* gegliedert. Bezüglich der menschlichen Gesundheit sind die Orte so zu wählen, dass dort Daten erhoben werden, wo die höchsten Werte auftreten. Spezifikationen ergeben sich anhand der Kategorisierung in verkehrsnahen Messungen, städtischer Hintergrund, ländlicher Hintergrund und Ökosysteme. Eines der wichtigsten Merkmale im Hinblick auf die Kategorisierung ist die Repräsentativität der Daten, welche von einigen km² (Städtischer Hintergrund) bis zu 10.000 km² (ländlicher Hintergrund) reichen können.

3.6. Referenzmessverfahren

Für jeden Schadstoff schreibt die BImSchV Messverfahren vor, welche durch DIN-Normen zertifiziert sind. Sie werden als Referenzmessverfahren bezeichnet. Durch einheitlich festgelegte Verfahren soll die Vergleichbarkeit der Daten gewährleistet werden. Dennoch können im Sinne des Nachweises der Gleichwertigkeit (Anlage 6B. 39. BImSchV) andere Messverfahren verwendet werden. Dies erfolgt unter der Prämisse, dass die Äquivalenz zum Referenzmessverfahren gegeben ist.

Um ein Bild darüber zu erhalten, welche Messverfahren den in Kapitel 4 dargestellten Werten zugrunde liegen, und für deren anschließende Analyse in Kapitel 5.1, werden im Folgenden für die ausgewählten Schadstoffe die DIN-zertifizierten Messmethoden vorgestellt.

3.6.1. Feinstaub PM_{10} und PM_{25} – Gravimetrisches Messverfahren

Das Referenzmessverfahren zur Bestimmung der Massenkonzentration von Feinstaub, mit einem diametrischen Durchmesser kleiner gleich $10\mu\text{m}$, beziehungsweise $2,5\mu\text{m}$, ist in der DIN EN 12341:2014, Ausgabe August 2014, „Außenluft – Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM_{10} - oder $PM_{2,5}$ -Massenkonzentration des Schwebstaubes“ beschrieben (39.BImSchV Anlage 6 A.).

Die in Abbildung 9 dargestellte Messapparatur gilt für beide Partikelfractionen. Der Aufbau unterscheidet sich entsprechend der zu bestimmenden Konzentration in Form von größeren bzw. kleineren Durchmessern am Einlass des Impaktors. Durch die Pumpe (7) wird Umgebungs-

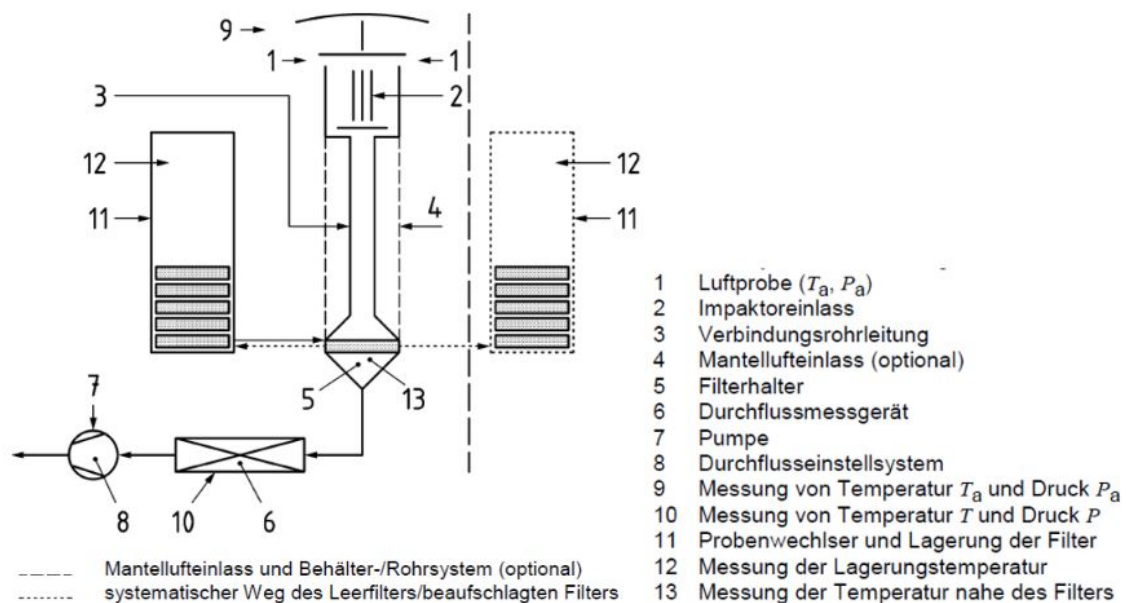


Abbildung 9: Darstellung der Referenzmessapparatur zur Bestimmung von Feinstaub [26]

Luft mit einem konstanten Volumenstrom (8) durch das Messsystem gesaugt. Die Luftprobe (1) gelangt in den Impaktoreinlass (2) und über die Verbindungsrohrleitung (3) auf den Filterhalter (5). Der Probenwechsler (11) tauscht im Intervall von 24h die beaufschlagten Filter mit Leerfiltern. Hierbei wird mindestens ein Filter in der Kassette nicht beaufschlagt, um in der nachfolgenden Wägung als Leerprobe zu dienen. Die Messapparatur besteht zudem aus einem Durchflussmessgerät (6) und weiteren Überwachungsgeräten zur Bestimmung von T und p (9,10,12,13)[26].

3.6.2. Ozon – Ultraviolett Photometrie

Die 39.BImSchV schreibt zur Bestimmung der Ozonkonzentration das in der DIN 14625:2012, Ausgabe Dezember 2012, „Außenluft – Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Ozon mit Ultraviolett-Photometrie“ beschriebene Verfahren vor (39.BImSchV Anlage 6 A.). In Abbildung 10 ist der schematische Aufbau eines Ein-Küvetten-Messgerätes nach DIN 14625 dargestellt. Durch die Pumpe (11) wird fortlaufend mit gleichem Volumenstrom Umgebungsluft in den Probeneingang (1) gesaugt. Mithilfe des eingebauten Filters (13) wird der Luftstrom von störenden Partikeln getrennt, und dann entsprechend der Schaltung des Magnetventils (4) direkt in die Absorptionsküvette geleitet. Andernfalls passiert die eingeogene Umgebungsluft den Ozonscrubber (3). Hierbei handelt es sich um einen Konverter, der aus einem Metalloxid besteht und durch seine chemischen Eigenschaften zur selektiven Zersetzung von Ozon führt. Die UV-Lampe (5) bestrahlt die Messküvette (6) mit einer Wellenlänge von 253,7nm. Bei diesem Wert erreicht der Ozon-Absorptionskoeffizient sein Maximum mit $\alpha = 308,32 \text{ cm}^{-1}$. Die

Strahlungsintensität wird von der Photodiode (8) in ein elektrisches Signal umgewandelt, und durch eine elektrische Schaltung (9) in der Anzeige (10) abgebildet [27].

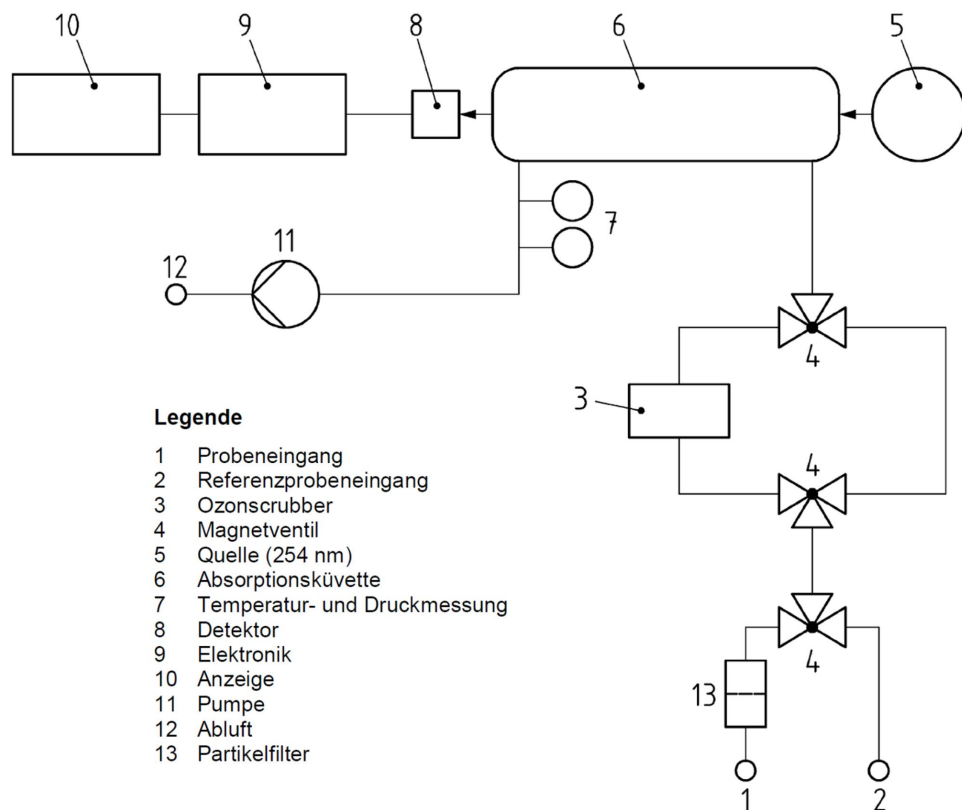


Abbildung 10: Darstellung der Referenzmessapparatur zur Bestimmung von Ozon [27]

3.6.3. Kohlenstoffmonoxid - NDIR-Photometrie

Das in der 39.BImSchV beschriebene Referenzmessverfahren zur Bestimmung der Kohlenstoffmonoxid (CO) Konzentration wurde in der DIN EN14626:2012, Ausgabe Dezember 2012, „Außenluft – Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Kohlenmonoxid mit nicht-dispersiver Infrarot-Photometrie (NDIR-Photometrie)“ erarbeitet (39.BImSchV Anlage 6 A.).

Unter einem nicht-dispersiven-Verfahren versteht man in der Spektroskopie den Verzicht auf eine spektrale Zerlegung der Strahlungsquelle (dispersives Verfahren). Die Selektivierung erfolgt bei NDIR-Verfahren durch die im Messgerät gespeicherte Messkomponente und entsprechende Filter.

Gemäß Abbildung 11 passieren die Strahlen der Infrarot (IR)-Quelle zunächst die optischen Mess- bzw. Referenzfilter (3). Die Gasfilterküvette selektiert den spektralen Absorptionsbereich für CO , wohingegen das neutrale Filter den Bereich erfasst, in dem keine Strahlung von

CO absorbiert wird. Über den Modulator (4), welcher der Anpassung des Strahlengangs dient, wird die gefilterte Strahlung auf Spiegel (6) geleitet, welche die Weglänge vergrößern und sich dadurch auf das Signal-Rausch-Verhalten positiv auswirken [28]. Nach dem das infrarote Licht das Probengas (5) durchstrahlt hat, gelangt es über den letzten Spiegel, und einem weiteren Filter (7) zum Detektor (8) [29].

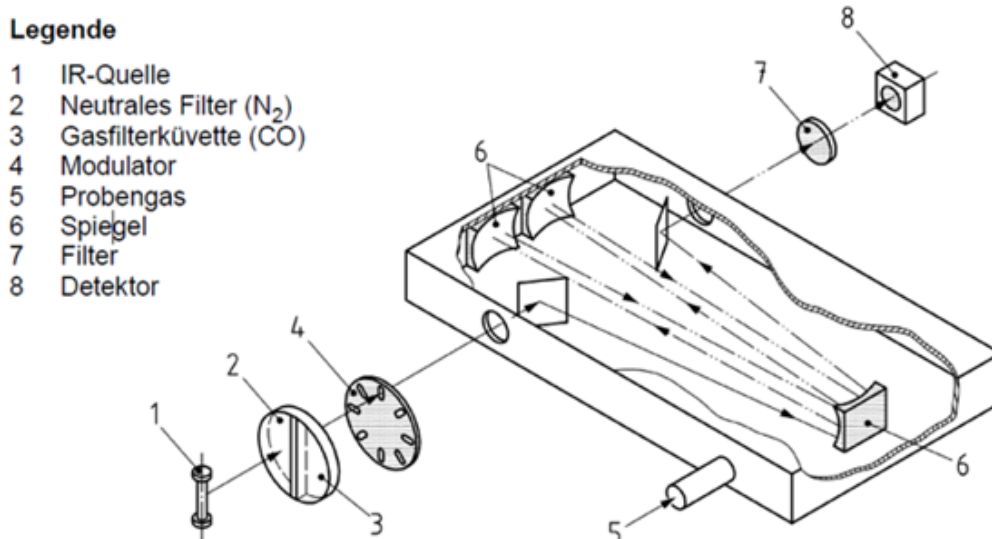


Abbildung 11: Darstellung der Referenzmessapparatur zur Bestimmung von Kohlenstoffmonoxid [29]

3.6.4. Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid - Chemilumineszenz

Zur Bestimmung der Konzentration von Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) gilt in der 39.BImSchV die europäische Referenzmethode DIN EN 14211:2012, Ausgabe November 2012, „Außenluft – Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid mit Chemilumineszenz“ (39.BImSchV Anlage 6 A.). Im Vergleich zu den vorherigen Verfahren stellt es eine komplexere Bestimmungsart da, weshalb die Beschreibung umfangreicher ausfällt.

Unter Chemilumineszenz versteht man eine spezifische Leuchterscheinung, welche durch freiwerdende chemische Bindungsenergie entsteht. Bei der quantitativen Bestimmung von Stickoxiden nach DIN EN 14211 reagiert Stickstoffmonoxid (NO) mit Ozon (O_3). Als Produkt dieser Reaktion ergibt sich zum einen in (Gl.5) NO in einem energetisch stark angeregten Zustand (NO_2^*), und NO_2 in seinem energetischen Grundzustand (Gl.6). Aus beiden Reaktionen erhält man zudem ein Sauerstoffmolekül. Das angeregte NO_2 -Molekül verlässt seinen energetische angeregten Zustand unmittelbar nach der Reaktion. Die Energieabgabe erfolgt in Form der Chemilumineszenz und wird in Gl.7 mit $h\nu$ ausgedrückt.



Gleichung 8 beschreibt den Zusammenstoß von angeregten NO_2 -Molekülen mit anderen Molekülen im Gasgemisch. Hierfür wird der Stoßparameter M eingeführt. Er verdeutlicht die Aufnahme von Energie, welche das angeregte NO_2 -Molekül abgibt. Folglich erreicht NO_2 in diesem Fall seinen Grundzustand ohne die Abgabe von Strahlung. Die Beobachtung der strahlungslosen Energieabgabe wird als Quenching bezeichnet. Mit der Gasdichte steigt die Wahrscheinlichkeit des Quenchings, da Moleküle mit einer größeren Wahrscheinlichkeit zusammenstoßen. Aufgrund dessen werden NO_2 -Messeinrichtungen mit einem konstanten Absolutdruck betrieben ($p=5-25\text{mbar}$). Aus Gl.5 und Gl.6 ist erkennbar, dass NO_2 nur dann bestimmt werden kann, wenn es vorher zu NO umgesetzt wird. Hierfür wird ein entsprechender Konverter benötigt.

Abbildung 12 stellt das nach DIN EN 14211 beschriebene Referenzmessgerät dar. Die Probengaspumpe (10) saugt kontinuierlich mit dem gleichen Volumenstrom Umgebungsluft durch das Messgerät. Durch den Partikelfilter (1) wird der Luftstrom von störenden Bestandteilen getrennt und gelangt durch die Ablaufsteuerung (13) entweder in den Konverter (2), oder direkt in die Reaktionskammer (9). Dort kommt es zur erläuterten Reaktion mit Ozon, welches über einen parallelen Strang in die Kammer gelangt. Das Gas wird, nachdem die Umgebungsluft den Trockner (7) und Filter (1) passiert hat, im Ozongenerator (8) gebildet. Hierfür wird der Sauerstoff aus der Umgebungsluft durch ein hohes elektrisches Feld geleitet, wo es zwar nur teilweise, aber trotzdem in dem Maße zu Ozon reagiert, dass es zu einem Überschuss des Gases kommt. Um störende Wellenlängen außerhalb der Chemilumineszenzstrahlung abzuspalten, ist ein optisches Filter (5) vor den Detektor (6) geschaltet. Letzterer ist in der Regel eine Photodiode, welche die Intensität der Strahlung in ein elektrisches Signal umwandelt und an eine Messschaltung weitergibt. Der Detektor wird in einem gekühlten Gehäuse (12) untergebracht, um Rauschen und Einflüssen von Temperaturänderungen entgegenzuwirken. Die Steuereinheit (4) regelt die Messung der unterschiedlichen Stickoxide. Zur genauen Mischung der Gasverhältnisse dienen drei Volumenstromregler (3) vor der Messkammer. Durch den Ozonfilter (11) gelangt die Abluft zurück in die Umgebung.

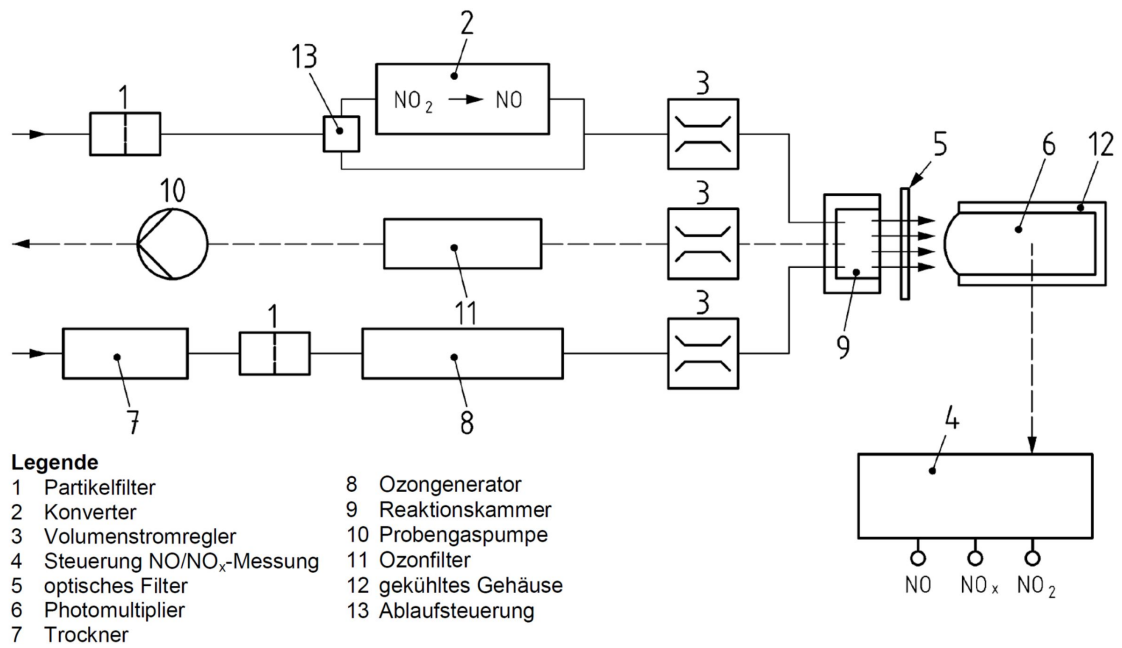


Abbildung 12: Darstellung der Referenzmessapparatur zur Bestimmung von Stickstoffdioxid [30]

4. Untersuchung von Publikationen zur Leistungsevaluierung von Low-Cost-Sensoren

Eine der gängigsten Methoden zur Beurteilung der Leistung von Low-Cost-Sensoren ist deren Platzierung neben Referenzmesssysteme, und ein kontinuierlicher Messvorgang beider Systeme. Aus den Messreihen werden anschließend die in Kapitel 4.3 vorgestellten Regressionsmetriken gebildet. Grundsätzlich wird zwischen Feld- und Laborevaluierungen unterschieden. Erstere bezieht sich auf die Leistungsbewertung im Freien. Die Messbedingungen sind also durch die Messumgebung bestimmt. Laborevaluierungen finden dagegen unter festgelegten Bedingungen statt. Unter festgelegten Bedingungen versteht man in diesem Kontext die Zuführung bekannter Konzentration der zu bestimmenden Schadstoffe bei konstanten atmosphärischen Parametern ($p = const.$; $RH = const.$; $T = const.$).

Für dieses Kapitel wurden Studien zusammengetragen, welche sowohl Feld- als auch Laborevaluierungen durchführten. Die aus den Studien entnommenen Regressionsmetriken sollen ein umfassendes Bild darüber geben wie LCS und SSys auf der Metaebene, bezogen auf Schadstoffe und Messtechniken, im Vergleich zu Referenzmesssystemen abschneiden. Weiterhin sollen die unter Kapitel 4.6 beschriebenen Methoden der Kalibrierung anhand der Regressionsmetriken betrachtet werden. Durch die Recherche lassen sich, neben der Aussage über die Leistung von Sensoren, weitere Erkenntnisse ableiten, die tiefgreifender in Kapitel 5 besprochen werden.

4.1. Anforderungen an die Daten

Aufgrund der rasanten technischen Weiterentwicklung von LCS wurden nur Studien in Betracht gezogen, deren Veröffentlichung zwischen dem 01.01.2018 und 01.06.2021 liegt. Aufgenommene Veröffentlichungen erfüllen die unter Kapitel 2.2 beschriebene Definition von LCS. Hinzukommen die Messungen von Referenzmesssystemen, die den Ansprüchen der in Kapitel 3.6 beschriebenen Referenzmessverfahren genügen, oder für die nach Anlage 6B. 39.BImSchV der Nachweis der Gleichwertigkeit vorliegt. Es wurden ausschließlich Daten herangezogen, die von unabhängigen Stellen erhoben wurden. Folglich befinden sich in der Datenbank keine Messdaten von Sensorherstellern oder Instituten, welche ein wirtschaftliches Interesse an der positiven Leistungsbewertung etwaiger Sensoren verfolgen. Alle Messdaten ergeben sich aus Studien, die in der deutschen oder englischen Sprache verfasst und durch den VPN-Zugang der HAW Hamburg erreichbar sind. Wie bereits in den vorangestellten Kapiteln erwähnt, bezieht sich diese Arbeit auf die vier ausgewählten Schadstoffe Ozon (O_3), Feinstaub (PM_{10} und $PM_{2,5}$), Stickstoffdioxid (NO_2) und Kohlenstoffmonoxid (CO).

Die vorliegenden Studien wurden durch die Eingabe und Kombination folgender Schlüsselwörter bei Google bzw. Google Scholar gefunden: *low-cost air quality sensors, calibration, performance evaluation, reference measurements, machine learning, random forest, multiple linear regression*. Entsprechende Publikationen wurden untersucht, und per crossref weitere Stu-

dien einbezogen. Dieser Vorgang wurde so lange weitergeführt, bis keine weiteren Artikel mehr gefunden wurden, die den Anforderungen genügen. Dennoch kann keine Garantie auf Vollständigkeit gegeben werden, da durch die Kombination der Schlüsselwörter nicht zwangsweise alle Publikationen erreicht wurden.

4.2. Quellen der Daten

Ein beachtlicher Anteil der Datensätze stammt vom Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (AQ-SPEC), welches dem South Coast Air Quality Management District (SCAQMD) unterstellt ist. Hierbei handelt es sich um eine Behörde zur Verbesserung der Luftqualität im Westen der USA. Weitere Publikationen stammen von öffentlich zugänglichen Plattformen wie Researchgate, European Geoscience Union (EGU), Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), ScienceDirect, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), EDP-Sciences und der Johns Hopkins Universität.

Folgende Evaluierungsprogramme konnten aufgrund der weit zurückliegenden Veröffentlichungen nicht in Betracht gezogen werden (Ausnahme JRC, eine Veröffentlichung). Im Sinne der Bedeutsamkeit derartiger Evaluierungen für LCS-Nutzer:innen, und der eventuellen Relevanz zukünftiger Veröffentlichungen werden sie hier dennoch kurz erwähnt.

Joint Research Center (JRC) – Europäische Union

Das von der europäischen Union ins Leben gerufene JRC, und die entwickelte AirMonTech database untersucht innerhalb ihres breiten Wissenschaftsbereichs auch Technologien zur Überwachung von Luftverschmutzung im urbanen Raum. Umfassende Evaluierungen fanden bis 2017 statt. Leider wurden in den nachfolgenden Jahren nur sporadisch Daten veröffentlicht. Zukünftige Veröffentlichungen werden im entsprechen Repositorium des JRC zu finden sein: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/>.

CAIRSENSE-Projekt - US Environmental Protection Agency (USEPA)

Durch dieses Projekt wurden kommerziell verfügbare Sensoren im Bereich vorhandener Referenzinstrumenten evaluiert, welche den Maßgaben nationaler Referenzmessverfahren entsprechen. Start der Messungen erfolgte im Jahr 2013. Die Ergebnisse wurden im November 2016 publiziert [31].

EuNetAir – Europäische Kooperation in Wissenschaft und Technik (COST)

Die EuNetAir Air Quality Joint-Exercise Intercomparison war die erste großangelegte Evaluierung von zirka 200 Sensoren in Aveiro, Portugal. Die Messungen starteten 2014 und bezogen sich auf nahezu alle in der europäischen Richtlinie 2008/50/EG festgelegten Schadstoffe [32].

AIRLAB – Frankreich

Das AIRLAB Programm wird von einem internationalen Konsortium begleitet und startete seine Evaluierungskampagne 2018. Sie wird jedes Jahr wiederholt und hat das Ziel eine unabhängige Bewertung kommerziell erhältlicher LCS oder SSys vorzunehmen. Die Veröffentlichungen der Evaluierungen entsprechen dem für diese Arbeit festgelegten zeitlichen Rahmen. Allerdings vergibt das AIRLAB für jeden Sensor Noten und veröffentlicht kein Regressionsmetriken gemäß 4.3. Die evaluierten Sensoren entsprechen somit nicht den Anforderungen. Die Ergebnisse der Microsensor Challenges sind dennoch eine interessante Datenbank für Nutzer:innen von Luftqualitätssensoren und können unter folgendem Link abgerufen werden: <http://www.airlab.solutions/en/projects/microsensor-challenge>.

4.3. Zugrundeliegende Regressionsmetriken

Anpassungsgüte R^2

Aufgrund der unterschiedlichen Beschreibungen von R^2 und im Sinne von Kapitel 5 wird die Metrik trotz des vorausgesetzten naturwissenschaftlichen Wissens potentieller Leser kurz beschrieben.

R^2 wird genutzt, um die Anpassung einer Regressionegerade zu bestimmen. Die Regressionsgerade lässt sich als die Gerade beschreiben welche sich den n vorgegebenen Messpunkten am besten anpasst. Für die vorliegenden Evaluierungsstudien ergibt sich zu jedem Zeitpunkt x ein Messwert der Referenz (y_{ref}), sowie ein Messwert des OEMS beziehungsweise SSys (y_s). Mit $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ($n = \text{Anzahl der Messungen}$) erhält man für SQE (Summe der Quadrate der erklärten Abweichungen) Gleichung 9)[33].

$$SQE = \sum_{i=1}^n (y_{s_i} - y_{ref_i})^2 \quad (9)$$

Durch SQT (Summe der Quadrate der totalen Abweichungen)[33]:

$$SQT = \sum_{i=1}^n (y_{s_i} - \bar{y}_{ref})^2 \quad (10)$$

ergibt sich für R^2 [33]:

$$R^2 = 1 - \frac{SQE}{SQT} \quad (11)$$

Root Mean Square Error (RMSE)

Unter dem RMSE versteht man die Wurzel aus der Mittelung der Fehlerquadrate zwischen Referenzwert und dem Messwert des LCS. Der RMSE hat die Einheit des Datensatzes und ist ein positiver Wert [34].

Gemäß denen im vorherigen Abschnitt verwendeten Bezeichnungen ergibt sich für RMSE Gleichung 12.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_{ref_i} - y_{s_i})^2}{n}} \quad (12)$$

Mean Absolute Error (MAE)

Wie in Gleichung 13 ersichtlich, beschreibt der MAE den Mittelwert des absoluten Fehlers zwischen jedem Konzentrationswert der Referenz und dem vom LCS gemessenen Wert. Wie beim RMSE erhält der MAE die Einheit der Messdaten und ist ein positiver Wert [34].

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|y_{ref_i} - y_{s_i}|}{n} \quad (13)$$

4.4. Überblick gesamte Datenbank A

Gemäß dem beschriebenen Anforderungen wurden insgesamt 1121 Messdaten aus 66 Publikationen in MS Excel zusammengetragen und ausgewertet. Die Visualisierung der Daten erfolgte mit Tableau Version 2020.1. 21 Messdaten wurden im Labor erhoben. Der restliche Teil, 1100 Messdaten stammen aus Messungen im Feld. In Abbildung 13 ist die Aufteilung der gesamten Datenbank A in Datensätze und Publikationen, bezogen auf die Jahreszahl der Veröffentlichung dargestellt.

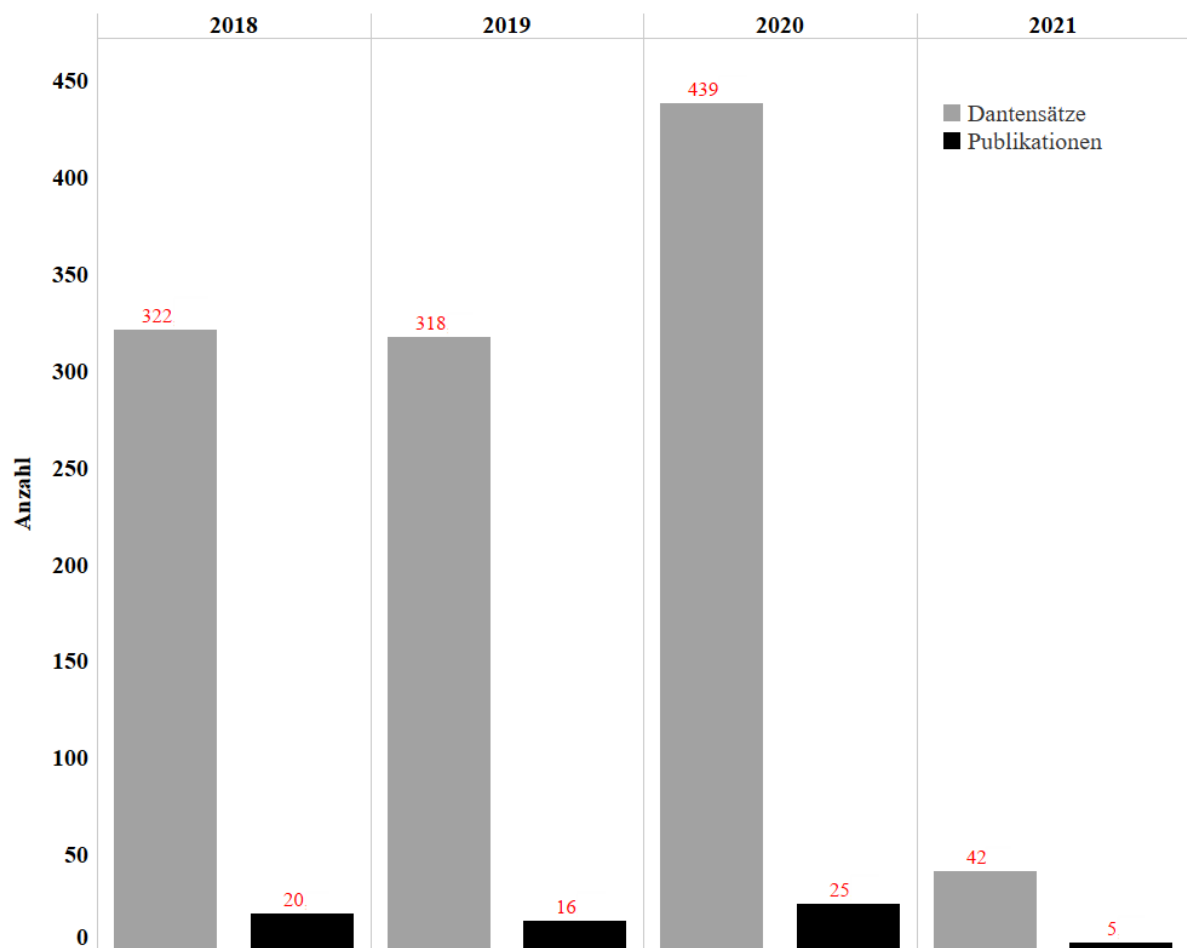


Abbildung 13: Anzahl der Datensätze und Publikationen, bezogen auf das Jahr der Veröffentlichung (Eigene Darstellung)

Unter *Datensatz* versteht sich im Zusammenhang dieser Arbeit eine Eintragung in die Datenbank. Sie stellt somit eine Zeile in Datenbank A (Anhang) dar. Anhand der Spalten der Datenbank lassen sich die unterschiedlichen Kategorien der Evaluierungen erkennen. *Model* und *Hersteller* dienen der Vollständigkeit und werden weiterführend nicht näher untersucht. *Jahr* bezieht sich auf die Jahreszahl der Veröffentlichung, dieses Kategorie wurde in der vorherigen Abbildung deutlich gemacht und wird daher nicht weiter besprochen.

Die relevanten Kategorien der Datenbank A sind *Schadstoff*, *Sensortechnik*, *Regressionsmetrik*, *Labor/Feld*, *Mittelung*, *Zeitraum* und *Kalibrierung*. Sie alle geben einen Eindruck darüber, nach welchen Maßstäben und Bedingungen LCS in der Literatur evaluiert werden. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Fokus auf diese Kategorien gesetzt. Zur weiteren Untersuchung gibt Abbildung 14 einen Überblick auf die Anzahl der Datensätze, bezogen auf vier ausgewählte Kategorien.

Anhand der Statistik lässt sich erkennen, dass sich ein bedeutender Anteil ($865/1124 \cdot 100\% = 76,96\%$) der Daten auf Evaluierungen von Feinstaub (PM_{10} und PM_{25}) bezieht. Dies spiegelt

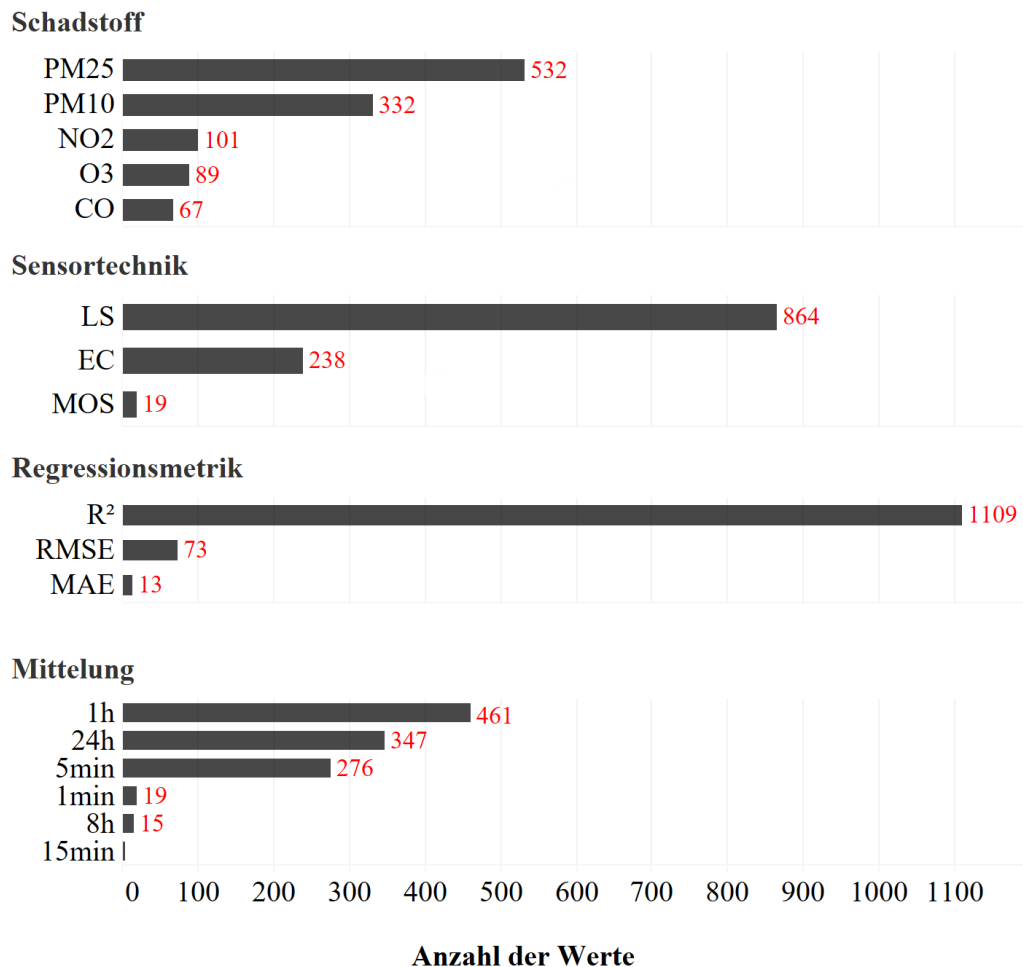


Abbildung 14: Anzahl der Werte für R^2 bezogen auf Schadstoff, Sensortechnik, Regressionsmetrik und Timestamp (Eigene Darstellung)

sich auch in der Anzahl der untersuchten Sensortechniken wider. Light Scattering (s.a. Kapitel 2.2.3) ist Bestandteil von 865 Datensätzen und damit die am häufigsten evaluierte Sensortechnik.

Anhand der *Regressionsmetriken* lässt sich erkennen, mit welchen statistischen Indikatoren Messdaten von LCS mit Referenzmesssystemen in Verbindung gebracht werden. Mean Absolute Error spielt bei den vorliegenden Leistungsbewertungen eine unbedeutende Rolle. Root Mean Square Error (*RMSE*) wurde mit 73 Beobachtungen in mehreren Studien zur Leistungsbewertung genutzt. Ein signifikanter Anteil der Datensätze bezieht sich auf die Anpassungsgüte R^2 , die mit 1109 Werten weitaus mehr Evaluierungen Verwendung findet als die restlichen Metriken. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass einzelne Publikationen teilweise mehrere Metriken bestimmen und daher die Summe von *MAE*, R^2 und *RMSE* nicht der Gesamtzahl der Datensätze (1121) entspricht. In Anbetracht dessen, und aufgrund der Häufigkeit von R^2 ,

werden weiterführend alle Werte, die sich auf *MAE* und *RMSE* beziehen, von Untersuchungen, welche sich ausschließlich auf die Leistungsangabe beziehen, ausgeschlossen. In Kapitel 5 wird auf die Rolle der Regressionsmetriken beim allgemeinen Evaluierungsvorgehen von LCS näher eingegangen.

Unter *Mittelung* wird in dieser Arbeit der Mittelungszeitraum einer bestimmten Wertereihe verstanden. Beispielsweise liefern die meisten Sensoren im Abstand von mehreren Sekunden bis wenigen Minuten einen Messwert. Zum Vergleich zweier Systeme müssen die Messungen jedoch auf den gleichen Zeitraum bezogen werden. In der Literatur werden die Messwerte eines Sensors häufig auf mehrere Zeitangaben gemittelt und anschließend, durch einbeziehen der Referenzwerte, der Wert der entsprechenden Regressionsmetrik bestimmt. Deswegen gibt Anhang A, bezogen auf diverse Mittelungszeiträume, verschiedene Werte für R^2 an. Sie liegen jedoch den gleichen Messreihen und Sensoren zugrunde. Mit diesem Hintergrund, und der Tatsache, dass die *Mittelung 1h* in Abbildung 14 vorherrschend ist, werden im Folgenden teilweise Datensätze untersucht, welche ausschließlich die 1h-Mittelung besitzen. Dies wird an betreffender Stelle nochmals angemerkt.

Ein wesentliches Unterscheidungskriterium ergibt sich durch die Art wie Sensoren kalibriert werden. In Kapitel 2.1 wurde bereits erläutert was sich unter einem kalibrierten Zustand von LCS verstehen lässt. Weiterhin wurde *fortgeschrittene Kalibrierung* definiert. Die Recherche umfasst Evaluierungen zu beiden Kalibrierzuständen. Da sich die Leistungsangaben in den entsprechenden Studien explizit auf die fortgeschrittenen Evaluierungsmethoden beziehen, wurde es als sinnvoll erachtet diese Datensätze von den Datensätzen zu separieren, welche die Angabe treffen, dass keine Kalibrierung evaluiert wurde. Die gesamte Datenbank A umfasst 1.008 Datensätze aus 52 Publikationen die keiner fortgeschrittenen Kalibrierung unterzogen wurden. Bei 113 Datensätzen aus 14 Publikationen wurden fortgeschrittene Kalibrierungen evaluiert. Für die weiterführende Untersuchung ist es zweckmäßig die Datensätze entsprechend dieser Anmerkungen zu teilen. Hierfür werden sinngemäß die Bezeichnungen Datenbank A.1. (keine fortgeschrittene Kalibrierung) und Datenbank A.2. (Datensätze fortgeschrittener Kalibrierungen) genutzt, ohne die Datenbank A im Anhang tatsächlich zu teilen. Abbildung 15 verdeutlicht diesen Bezugsrahmen.

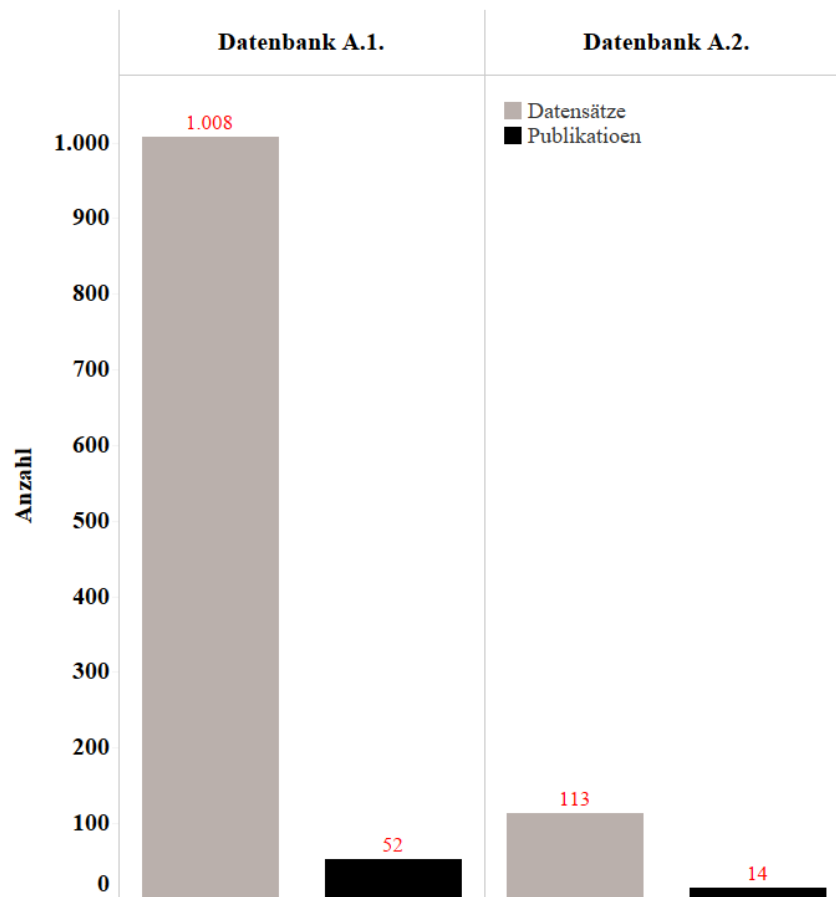


Abbildung 15: Anzahl der Datensätze und Publikationen gemäß der Aufteilung der gesamten Datenbank A in Datenbank A.1. und Datenbank A.2. (Eigene Darstellung)

Für einen besseren Überblick ist es notwendig die durchgeführte Untersuchung anhand eines Ablaufschemas zu verdeutlichen. Hierfür dient Abbildung 16. Aus dem Schema lässt sich ableiten, dass neben der Separierung des gesamten Datensatzes weitere Ausgrenzungen bestimmter Kategorien oder Merkmale der Datenbank A folgen. Dieses Vorgehen wird an entsprechender Stelle in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben. Zum weiteren Verständnis dient außerdem die Legende am unteren rechten Rand der Abbildung.

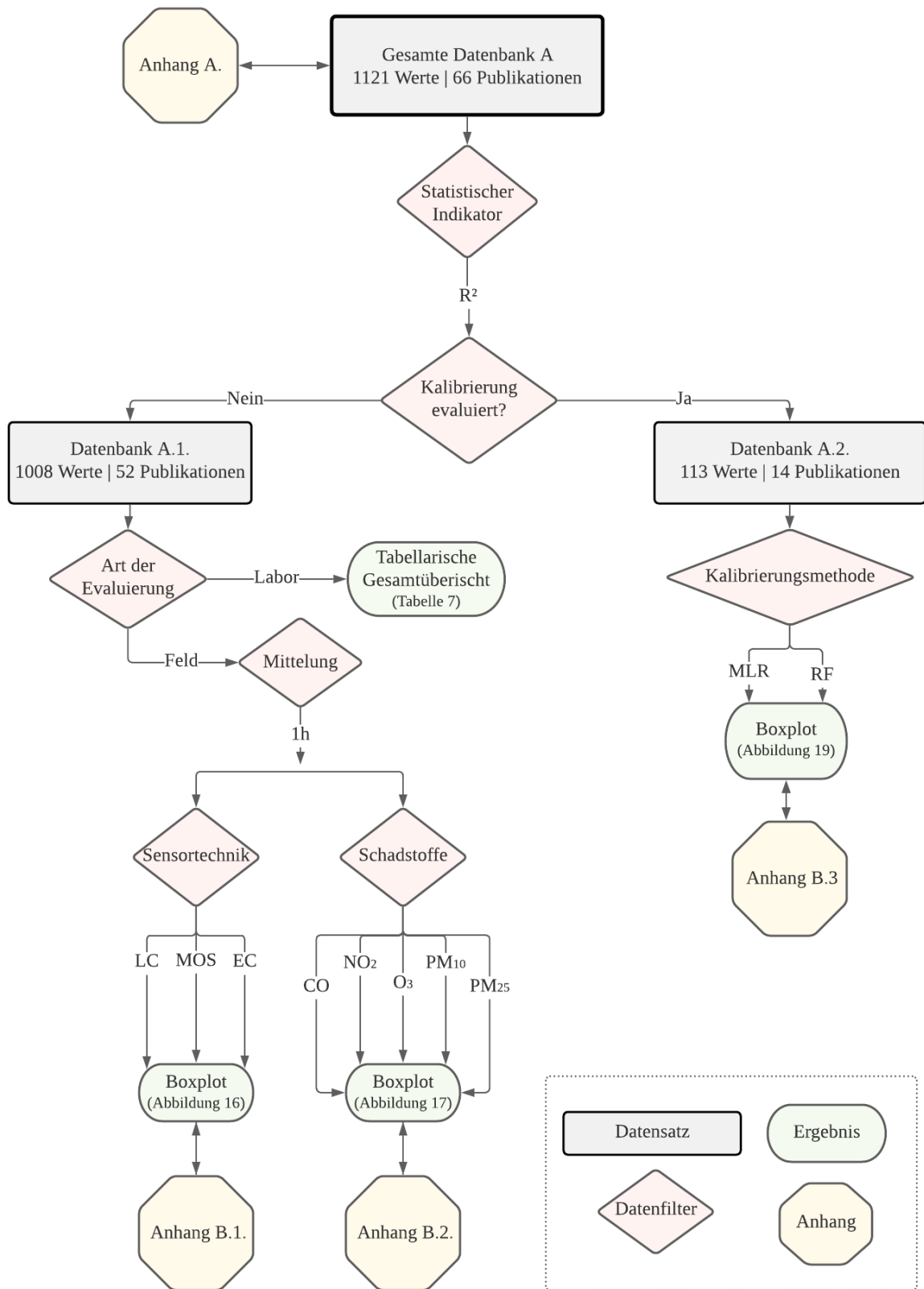


Abbildung 16: Ablaufschema der Untersuchung (Eigene Darstellung)

4.5. Datenbank A.1.

Ein weiteres Merkmal, welches die Aufteilung der gesamten Datenbank unterstreicht, ist die Tatsache, dass alle Datensätze aus Datenbank A.1. von der gleichen Institution erhoben wurden, dem AQ-SPEC. Hierdurch wird die nachfolgende Untersuchung der Datensätze erleichtert, da ein einheitlicher Evaluierungsrahmen vorliegt. Grundsätzlich werden alle Sensoren im Feld evaluiert, und danach gegebenenfalls im Labor weiteren Tests unterzogen. Für die zugrunde liegende Datenbank von 1008 Messwerten sind allerdings nur 21 im Labor erfasst worden. Alle Laborevaluierungen sind Teil von Datenbank A.1. Da sich das Vorgehen bei Feld- und Laborevaluierungen stark unterscheidet (siehe weitere Ausführungen), werden die Datensätze getrennt voneinander betrachtet.

4.5.1. Feldevaluierung

Das Vorgehen für die Feldevaluierungen lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- a) Es werden immer 3 Sensoren des gleichen Modells untersucht
- b) Der zeitliche Rahmen der Evaluierung umfasst in der Regel 2 Monate
- c) Die Sensoren werden keiner Kalibrierungsmethode unterzogen
- d) Es werden sowohl LCS als auch SSys untersucht
- e) Standort der Evaluierung war für alle Sensoren die behördliche Messstation von AQ-SPEC in Rubidoux, Los Angeles, CA, USA.
- f) Die Messdaten wurden zu unterschiedlichen Jahreszeiten und daher unter saisonalen Schwankungen erfasst
- g) Es wurde ausschließlich der statistische Indikator R^2 bestimmt
- h) Die Messwerte werden zu 24h, 8h, 1h, 5min und 1min aggregiert
- i) Als Referenzmesssysteme kamen die folgenden Geräte zum Tragen: GRIMM EDM180 (PM_{10} , PM_{25}), Teledyne API T640 (PM_{25}), MetOne 1020 BAM (PM_{10}), Horiba APMA 370 (CO), Thermo Scientific 42i (NO_2), Thermo Scientific 49i (O_3)

Bezüglich c) muss angemerkt werden, dass das AQ-SPEC in den entsprechenden Evaluierungen ohne Ausnahme die Angabe getroffen hat, dass keine Kalibrierungen seitens der Behörde stattgefunden haben. Dennoch sollte darauf hingewiesen werden, dass SSys und LCS unter Umständen von Seiten der Hersteller kalibriert wurden.

Wie im vorherigen Unterkapitel angesprochen ist es bezüglich h) sinnvoll die Datenmenge

gemäß der 1h-Aggregation zu filtern. Dies erfolgt für die nachfolgenden Untersuchungen in diesem Unterkapitel. Die Datenmenge reduziert sich somit auf 380 Werte.

Die letztendliche Bewertung der Leistung von OEMS und SSys im Vergleich zu zertifizierten Referenzinstrumenten erfolgt zum einen in Bezug auf die in Kapitel 2.2 erläuterten Sensortechniken (EC, MOS, LS) und in einem zweiten Schritt hinsichtlich der für diese Arbeit festgelegten Schadstoffe (NO_2 , O_3 , CO , PM_{10} , PM_{25}). Durch letzteres soll vor allem das Verständnis erhöht werden, für welche Schadstoffparameter besondere Schwierigkeiten im Hinblick auf die Einflussfaktoren gemäß Kapitel 5.1 vorliegen.

Die Verteilung von R^2 wird im weiteren Verlauf mit Hilfe von Boxplots abgebildet. Für alle Darstellungen erstrecken sich die Whisker auf dem 1,5-fachen des Interquartilbereichs (IQR). Bis auf Ausreißer werden die zugrundeliegenden Daten zur besseren Übersicht ausgeblendet. An entsprechender Stelle wird auf die Tabelle im Anhang verwiesen, die als Ausschnitt von Datenbank A zu verstehen ist. Folgende Abkürzungen beziehen sich auf alle Darstellungen und werden daher einmalig an dieser Stelle erwähnt: Oberer Whisker (OW), 3. Quartil (Q3), Median (M), 1. Quartil (Q1), Unterer Whisker (UW).

Leistungsbewertung anhand von R^2 bezogen auf Sensortechnik (Abbildung 17)

Die Datenmenge für elektrochemische Sensoren umfasst 58 Werte. Durch den kurzen Abstand zwischen dem 3.Quartil (0,901) und dem oberen Whisker (0,9761) liegt eine rechtsteile Verteilung vor, welche durch die Lage des Median (0,7767) unterstrichen wird. Der große Abstand zwischen dem oberen und unteren Whisker (0,001) deutet auf eine große Streuung der Daten hin. Der Median gibt an, dass 29 Werte zwischen 0,776 und 0,9761 liegen.

Für die Laser-Scattering-Technik liegen 319 Werte vor. Wie bei den EC-Sensoren handelt es sich unter der Berücksichtigung des oberen Whiskers (0,9298) und Lage des Medians (0,7767) um eine rechtsteile Verteilung. Dies wird auch durch den großen Abstand zwischen dem 1.Quartil (0,3301) und dem unteren Whisker (0,001) deutlich. Das Boxplot deutet ein weiteres Mal auf eine breite Verteilung der Messdaten hin, was durch die Lage des oberen und unteren Whiskers zum Ausdruck gebracht wird. 50% der Messdaten liegen unterhalb von 0,6243.

MO-Sensoren liegen nur 3 Werte (0,9847; 0,9816; 0,978) vor. Eine Interpretation der Datenlage im Sinne der Metaebene dieser Sensortechnik ist daher nicht zweckmäßig.

Leistungsbewertung anhand von R^2 bezogen auf Schadstoffparameter (Abbildung 18)

Für CO liegen nur 15 Werte vor. Aufgrund der geringen Datenlage kann keine quantitative Aussage bezüglich der Metaebene dieser Sensortechnik gegeben werden. Die Datenmenge

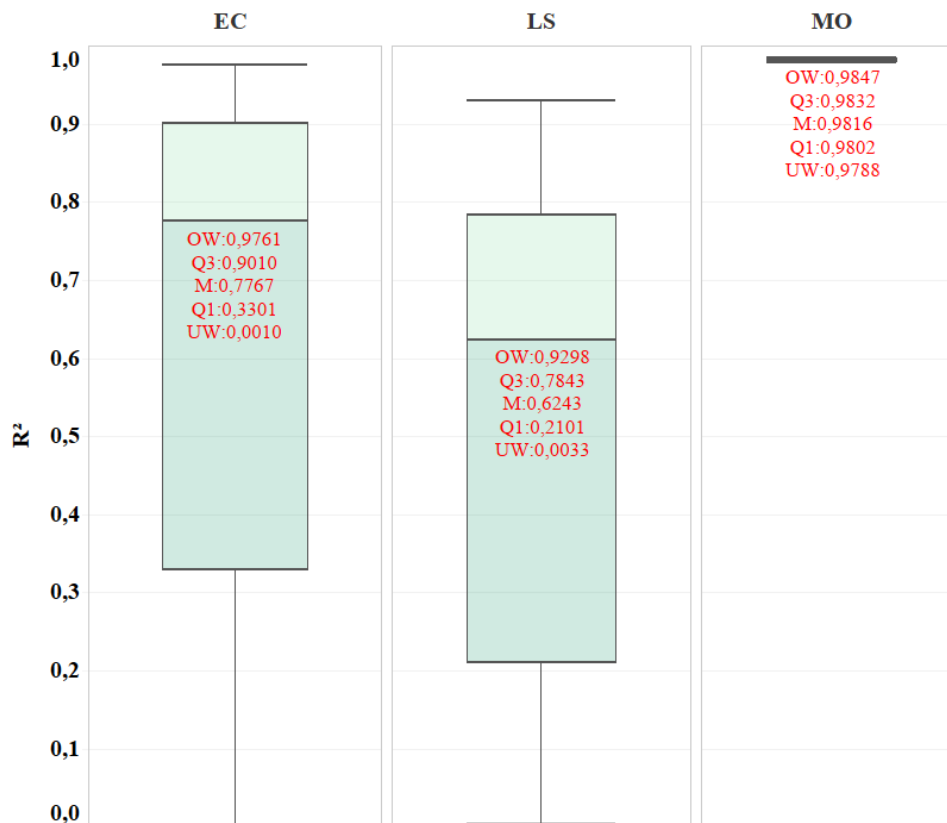


Abbildung 17: Verteilung von R^2 bezogen auf die untersuchten Sensortechniken elektrochemisch (EC), laser scattering (LS) und metalloxid (MO). Eigene Darstellung auf Grundlage von Anhang B.1

für O_3 umfasst 22 Werte. Durch den Vergleich der Abstände zwischen OW (0,9847) und Q3 (0,9612) sowie Q1 (0,7352) und UW (0,6679), sowie der Lage des Medians (0,9032) lässt sich auf eine rechtsteile Verteilung schließen. Abgesehen von den Ausreißern (0,001; 0,0042; 0,08) konzentrieren sich alle Werte in einem vergleichsweise engen Bereich $0,6679 \leq R^2 \leq 0,9847$. 11 der Werte sind größer als 0,9032.

Für NO_2 liegen 24 Werte vor. Der breite Interquartilbereich und die langen Abstände der oberen (0,8256) und unteren (0,003) Whisker zu Q3 (0,7017) beziehungsweise Q1 machen eine große Streuung der Messdaten deutlich. Durch die Lage des Medians (0,45) kann auf eine fast symmetrische Verteilung geschlossen werden.

Die 123 Werte für PM_{10} weisen dagegen eine linksteile Verteilung auf. Dies macht sich durch die Lage des unteren Whisker (0,0033) und dessen Abstand zum 1.Quartil (0,0976) bemerkbar. Die Aussage wird, neben der Lage des Medians (0,1905), durch den großen Abstand zwischen 3.Quartil (0,3437) und oberem Whisker (0,6397) verdeutlicht. Insgesamt liegen für PM_{10} 7

Ausreißer im Bereich $0,7378 \leq R^2 \leq 0,903$ vor, dies lässt sich im Anhang B.2 besser erkennen als in Abbildung 18, da aufgrund der Darstellungsweise Ausreißer teilweise nicht angezeigt werden.

Mit 196 Werten liegen bezüglich der Schadstoffe für PM_{25} am meisten Daten vor. Bei der Betrachtung des Interquartilbereichs könnte man auf eine symmetrische Verteilung schließen, da die Abstände des Medians (0,7443) zum 3.Quartil (0,8348) und 1.Quartil (0,6361) fast gleich sind. Diese Aussage kann jedoch bei der Betrachtung des oberen (0,9289) und unteren (0,4064) Whiskers widerlegt werden. Die unterschiedlichen Längen der Whisker sind auf die zahlreichen Ausreißer zurückzuführen. Diese liegen zwischen $0,027 \leq R^2 \leq 0,3364$.

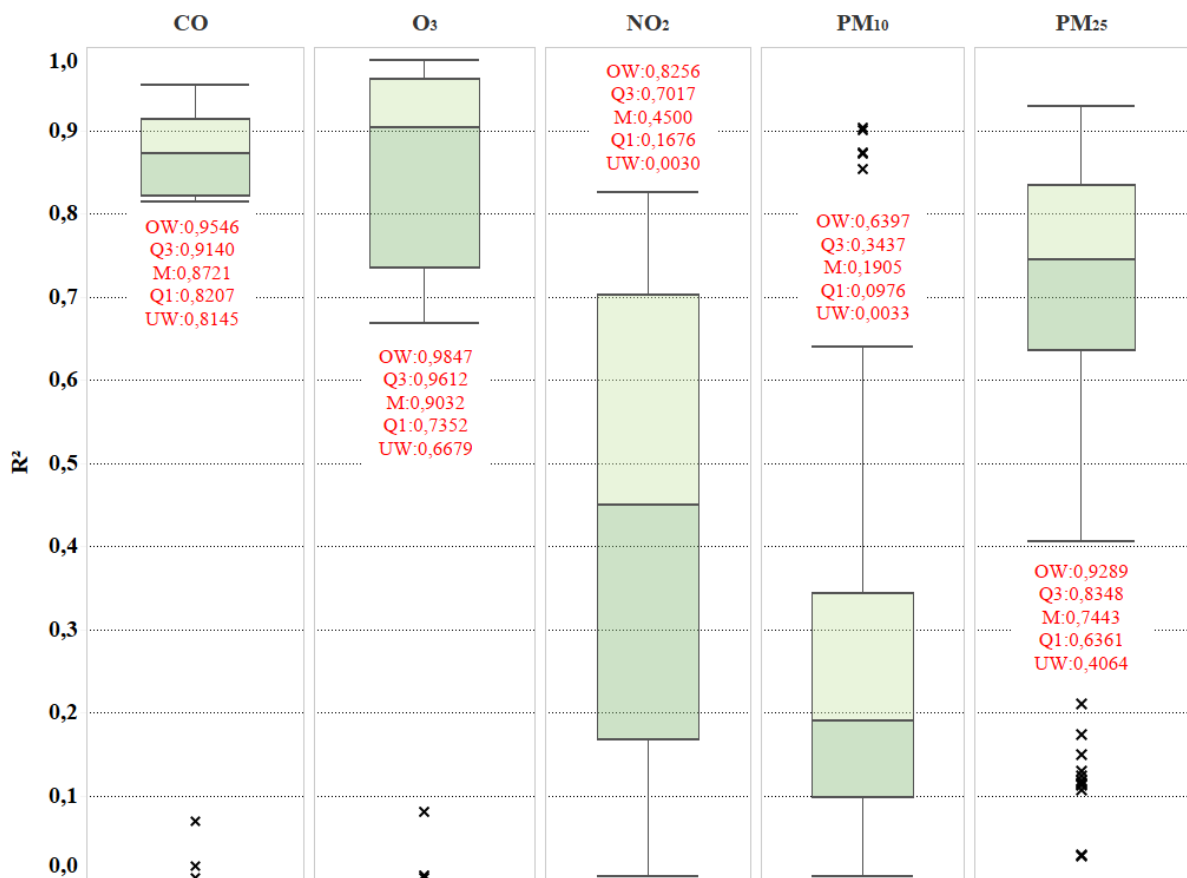


Abbildung 18: Verteilung von R^2 bezogen auf die untersuchten Schadstoffparameter Kohlenstoffmonoxid (CO), Ozon (O_3), Stickstoffdioxid (NO_2) und Feinstaub (PM_{10} , PM_{25}). Eigene Darstellung auf Grundlage von Anhang B.2

4.5.2. Laborevaluierung

Das Vorgehen von Evaluierungen im Prüflabor von AQ-SPEC lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- a) Es werden immer 3 Sensoren des gleichen Modells untersucht
- b) Der zeitliche Rahmen der Evaluierung umfasst in der Regel 900 Minuten
- c) Die Sensoren werden keiner Kalibrierungsmethode unterzogen
- d) Es werden sowohl LCS als auch SSys untersucht
- e) Standort der Evaluierung war für alle Messdaten das South Coast AQMD Chemistry Laboratory in Rubidoux, Los Angeles, CA, USA
- f) Alle drei Geräte durchlaufen in der Testkammer 5 verschiedene Stufen, in denen die zu bestimmende Schadstoffkonzentration erhöht wird
- g) Alle drei Geräte durchlaufen in der Testkammer 3 verschiedene Stufen, in denen die Temperatur und Luftfeuchtigkeit erhöht wird
- h) Zusammengefasst für alle 3 Sensoren werden qualitative Aussagen zu Genauigkeit, Präzision, Intra-Modell-Variabilität (Vergleich der 3 Sensoren untereinander bezüglich der Messwerte), Datenverfügbarkeit, Anfälligkeit für klimatische Veränderungen getroffen
- i) Die Daten werden zu 1min- oder 5min-Werten aggregiert
- j) R^2 wird ausschließlich für den Mittelwert der drei Messreihen und der Messreihe des Referenzinstruments gebildet
- k) Als Referenzmesssysteme kamen die folgenden Geräte zum Tragen: GRIMM EC180 (PM_{10} , PM_{25}), TSI Modell 3321 (PM_{25}), Ecotech Serinus 40 (NO_2), Ecotech Serinus 10 (O_3)

Aufgrund der geringen Datenmenge wurde es nicht für sinnvoll erachtet ein Boxplot zu erstellen. Alle 21 Messdaten sind in Tabelle 7 zusammengetragen.

Tabelle 7: Gesamtübersicht der Laborevaluierungen. Referenzen führen direkt zum technischen Bericht (PDF). Veröffentlichung der Berichte auf der Webseite von AQ-SPEC: <http://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations/laboratory>

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messtyp | Mittelung | OEMS/SSys | R^2 | Referenz |
|----------------|-----------------|------------|---------|-----------|-----------|--------|----------|
| AQY | Aeroqual | O3 | EC | 1min | SSys | 0,9750 | [35] |
| AQY | Aeroqual | NO2 | EC | 1min | SSys | 0,9802 | [35] |
| AQY | Aeroqual | PM10 | LS | 5min | SSys | 0,9989 | [35] |
| AQY | Aeroqual | PM25 | LS | 5min | SSys | 0,9987 | [36] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | 5min | SSys | 0,9938 | [37] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM25 | LS | 5min | SSys | 0,9913 | [38] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | 5min | SSys | 0,9954 | [38] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | 5min | SSys | 0,9923 | [38] |
| Atmotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | 5min | SSys | 0,9985 | [39] |
| DC1700-PM | Dylos | PM25 | LS | 5min | SSys | 0,9543 | [40] |
| LKC-1000S+ | Temptop | PM25 | LS | 5min | SSys | 0,9988 | [41] |
| M2000 2.Gen. | Temptop | PM25 | LS | 5min | SSys | 0,9990 | [42] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | 5min | SSys | 0,9989 | [43] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung S&C | PM25 | LS | 5min | OEMS | 0,9884 | [44] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | 5min | OEMS | 0,9950 | [45] |
| Kit v2,1 | Smart Citizen | PM25 | LS | 5min | SSys | 0,9987 | [46] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | 5min | SSys | 0,9990 | [47] |
| Model 2018 | Air Quality Egg | PM25 | LS | 5min | SSys | 0,9991 | [48] |
| Air Visual Pro | IQAir | PM25 | LS | 5min | SSys | 0,9990 | [49] |
| Air A10 - PM | Kunak | PM25 | LS | 5min | SSys | 0,9978 | [50] |
| Nubo | Sensirion | PM25 | LS | 5min | SSys | 0,9988 | [51] |

Wie in Tabelle 7 ersichtlich, stammt ein erheblicher Anteil der Daten (19) von Feinstaubsensoren, die entweder PM_{10} oder PM_{25} detektieren. Nur zwei der aufgenommenen Werte beziehen sich auf Gassensoren. Die R^2 -Werte der Evaluierungen liegen zwischen $0,9543 \leq R^2 \leq 0,999$.

4.6. Datenbank A.2.

Wie bereits angekündigt bezieht sich Datenbank A.2. ausschließlich auf Daten von Sensoren, welche einer fortgeschrittenen Kalibrierung unterzogen wurden. Anders als bei der vorherigen Datenbank stammen die zusammengetragenen Werte von unterschiedlichen Institutionen und Forschungsgruppen (s.a. Kapitel 4.2). Folglich liegt kein einheitlicher Evaluierungsrahmen vor. Diese Datenmenge soll einen Überblick geben, welche Kalibrierungsmethoden am häufigsten Anwendung finden, und die besten Werte liefern.

Wie in Kapitel 4.3 müssen die Regressionsmetriken $RMSE$ und MAE immer in Bezug zur vorhandenen Messreihe gesetzt werden. Es ist daher nicht aufschlussreich diese Parameter außerhalb der Datensätze zu vergleichen. Die folgenden Abbildungen beziehen sich daher ausschließlich auf R^2 . Abbildung 19 gibt einen Überblick, der Methoden, die in den untersuchten Publikationen am häufigsten angewendet wurden.

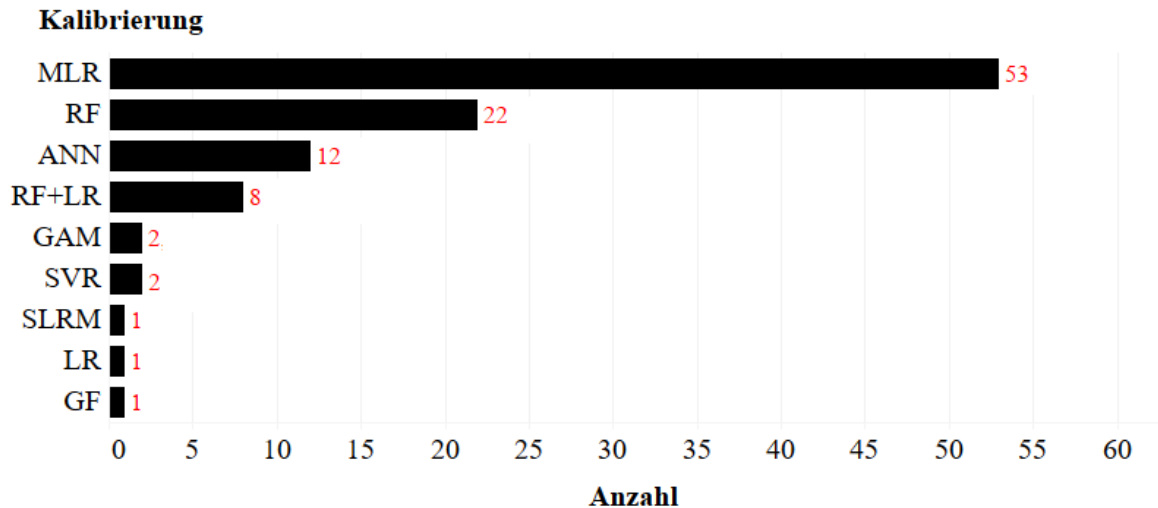


Abbildung 19: Anzahl der Wertereihen bezogen auf die beobachteten Kalibrierungsmethoden (Eigene Darstellung)

Anhand der Abbildung lässt sich erkennen, dass die meisten Publikationen Multiple lineare Regression (MLR) und Random Forest (RF) verwenden. Es wurde darauf verzichtet, die Kombination aus RF+LR (Lineare Regression) mit dem Random Forest Modell gleichzusetzen. Für die Verteilung von R^2 bezogen auf die zwei am häufigsten vorkommenden Modelle (MLR und RF) ergeben sich die in Abbildung 20 vorgestellten Boxplots.

Zum Verständnis und im Sinne von Kapitel 5.1 werden die fortgeschrittenen Kalibriermethoden, die am häufigsten angewendet wurden an dieser Stelle kurz beschrieben. Aufgrund des begrenzten Rahmens dieser Arbeit kann nicht auf alle Methoden der Datenbank A.2. eingegangen werden.

Random Forest (RF)

Das RF-Modell ist eine Methode des maschinellen Lernens und besteht aus sogenannten Decision Trees (z. Dt. Entscheidungsbäume). Jeder dieser Bäume besteht aus mehreren Knoten. Diese Knoten stehen für eine bedingte Prüfung, dessen Argument beispielsweise $RH = 45\%$ sein könnte. Jeder Zweig eines Baumes steht wiederum für ein Ergebnis dieser Prüfung, beispielsweise $CO = 45g/m^3$. Ein RF-Modell setzt sich aus mehreren hundert solcher Bäumen zusammen. Das Ergebnis der Kalibrierung ergibt sich aus den Zweigen der einzelnen Bäume. Zur Entwicklung des Prüfungsarguments werden die Modelle zunächst mit Datensätzen unkalibrierter und korrekter Konzentrationswerte gespeist. Nach diesem Trainingsvorgang werden die Modelle anhand von Referenzwerten evaluiert [52].

Multiple Lineare Regression (MLR)

MLR basiert auf der einfachsten Anpassungsmöglichkeit für LCS, der linearen Regression. Die angesprochene Anpassungsgerade in Kapitel 5.3.1 lässt sich als lineare Gleichung darstellen. Werden weitere Variablen in diese Gleichung einbezogen spricht man von MLR. Hierbei sind vor allem RH und T häufig angewendete Faktoren (s.a. Kapitel 5.1). Ähnlich wie bei RF-Modellen ergibt sich das angepasste Messergebnis aus einem Trainingsdatensatz und folgt prinzipiell Gleichung 14, die als Beispiel für eine PM_{25} -Anpassung dienen soll.

$$\hat{y} = b_1 \cdot RH + b_2 \cdot T + b_3 \cdot PM_{25} + a \quad (14)$$

Die Koeffizienten b_1 , b_2 und b_3 sind dabei maßgebend für den Einfluss der Prädiktoren (RH , T , PM_{25}). Zusammen mit der Regressionskonstanten a werden sie durch den Trainingsdatensatz bestimmt. Als Ergebnis der einzelnen Faktoren erhält man die Schätzung des Konzentrationswertes \hat{y} .

Die 22 Messwerte der Random Forest (RF) Kalibrierungsmethode zeigen eine rechtsteile Verteilung. Wie bei den vorherigen Verteilungen, lässt sich dies deutlich durch die Länge der Whisker und der Lage des Medians innerhalb des Interquartilsbereich erkennen. Abgesehen von einem Ausreißer bei $R^2 = 0,44$ befinden sich alle Messwerte zwischen 0,97 (oberer Whisker) und 0,63 (unterer Whisker). 50% der Werte liegen über 0,875 (Median). 25% der Daten liegen zwischen 0,767 (1.Quartil) und 0,44. Für die restlichen 25% der Werte (3.Quartil) gilt $0,927 \leq R^2 < 0,97$.

Die Methode der Multiplen Linearen Regression (MLR) umfasst mit 53 Werten mehr als doppelt so viele Beobachtungen als RF. Die Lage des Medians (0,87) deutet auf eine symmetrische Verteilung hin. Dies kann jedoch durch die Länge der Whisker widerlegt werden, da der Abstand zwischen 3. Quartil (0,913) und oberem Whisker (0,98) größer ist als der Abstand zwischen dem 1. Quartil (0,813) und dem unteren Whisker (0,69). Die leicht rechtsteile Verteilung lässt sich auf die 2 beobachteten Ausreißer (0,62; 0,51) zurückführen, welche zu einer größeren Streuung unterhalb des Medians führen.

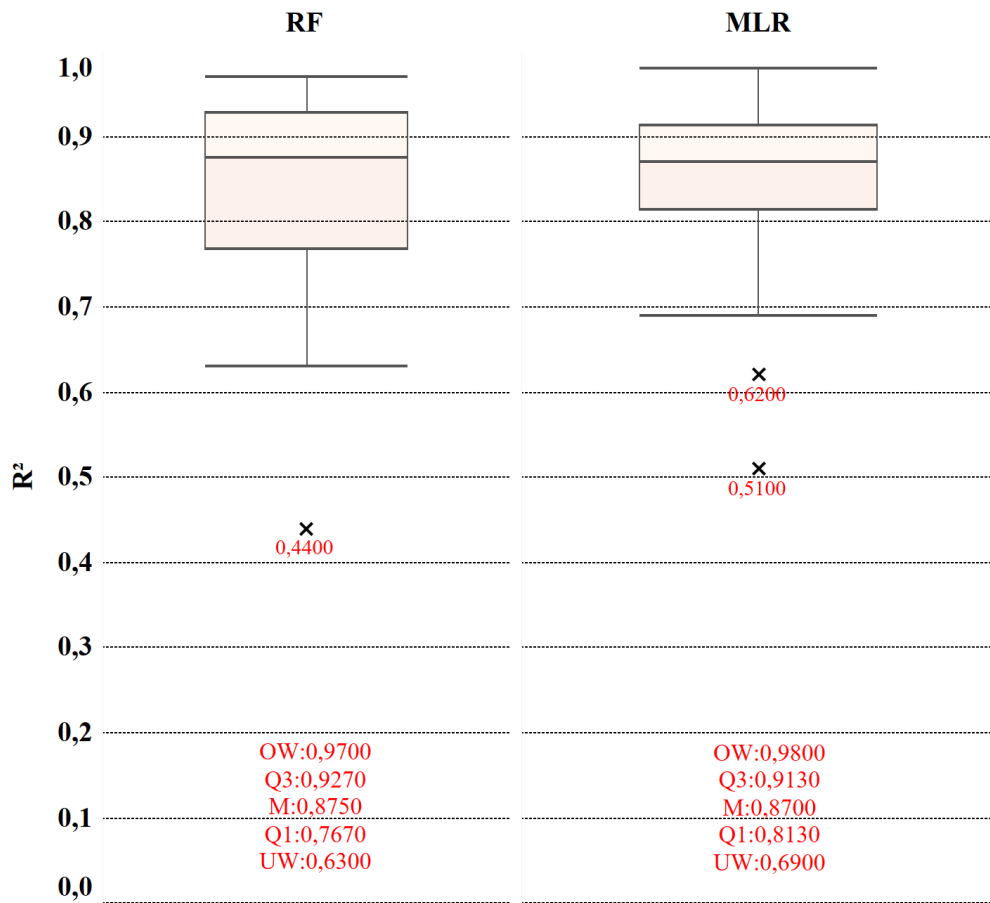


Abbildung 20: Verteilung von R^2 bezogen auf die in der Literatur am häufigsten angewendeten Kalibrierungsmodelle (RF und MLR). Eigene Darstellung auf Grundlage von Anhang B.3

5. Analyse und Bewertung der Rechercheergebnisse

Dieses Kapitel analysiert die in den vorherigen Kapiteln zusammengetragenen Informationen. Zunächst sollen im Hinblick auf das Kapitel 4 die Leistungsgrenzen anhand der Sensortechniken untersucht werden. In einem weiteren Schritt wird auf die Möglichkeiten von LCS im Zusammenhang mit der 39.BImSchV eingegangen. Die Ausführungen im darauffolgenden Unterkapitel 5.3 verknüpfen einige Erkenntnisse aus den nachfolgenden Erläuterungen und beziehen weitere Informationen aus der Datenbank A ein.

5.1. Messtechnische Ebene

Die Bewertung von LCS anhand der Regressionsmetrik R^2 erfolgt im weiteren Verlauf durch die Analyse der beschriebenen Referenzmessverfahren in Kapitel 3.6 und den LC-Sensortechniken in Kapitel 2.2, sowie den dargestellten Boxplots im vorherigen Kapitel. Bekannte Störgrößen von LCS-Messtechniken werden mit der jeweiligen Technik und dem zu detektierenden Schadstoff in Verbindung gebracht. Da sich einzelne Effekte auf mehrere Techniken beziehen, wurde es als sinnvoll erachtet eine Darstellung aller bekannten Einflüsse zu erarbeiten. Weiterhin wurden die technischen Lösungen der Referenzmesssysteme bezüglich der Fehlerquellen festgestellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 21 dargestellt.

Für ECS wurde eine breite Verteilung von R^2 festgestellt. Allerdings befinden sich 50% der Sensoren in einem Bereich von sehr guter Anpassungsgüte, zwischen 0,7767 und 0,9761. Ein Grund für die guten Werte ist der geringe Zeitraum (2 Monate), in dem die Sensoren den Vergleichsmessungen unterzogen wurden. Bei der Betrachtung von Abbildung 21 lässt sich erkennen, dass ausschließlich die Stränge der ECS zur *Langlebigkeit* führen. Dies hängt mit der vergleichsweise geringeren Lebensdauer von EC-Sensoren zu anderen Sensortechniken zusammen. Castell et. al [4] geben die Lebensdauer von für EC-Sensoren mit 2-5 Jahren an. Für MOS wurde dagegen eine erfolgreiche Messdauer von 7 Jahren beobachtet [53]. Die geringere Lebensdauer lässt sich auf die in Kapitel 2.2.1 beschriebenen chemischen Reaktionen im Elektrolyten zurückführen. Zur Verlängerung der Gesamtmessdauer können die Reaktionen pro Zeit limitiert werden, was durch die Verringerung der Durchlässigkeit der Membran erreicht wird. Als weiteren Effekt wird dadurch jedoch die Antwortzeit des Sensors verlängert [28]. Dies kann dem Anwendungsfall entsprechend als unproblematisch angesehen werden, wenn die Schadstoffkonzentration nicht innerhalb enger Zeiträume bestimmt werden soll.

Zertifizierte Messgeräte besitzen eine weitaus längere Betriebszeit als LCS. Dies hängt mit den strengen Prüf- und Wartungskriterien, sowie dem schützenden Gehäuse zusammen. Einzelne Komponenten werden bei Verschleiß ausgetauscht. Störende Partikel welche die Messung beeinflussen und die Instrumente langfristig schädigen, werden durch Filter abgetrennt.

Als zusätzlichen Einflussfaktor sollte die *Querempfindlichkeit* zu reduzierenden bzw. oxidierenden Gasen angemerkt werden, die für alle Schadstoffparameter der ECS zutreffen (s.a. Abbildung 21). Sie bezieht sich vor allem auf die entsprechenden Schadstoffe und deren Eigenschaften an der gassensitiven Schicht oder im Elektrolyten Elektronen abzugeben bzw. aufzunehmen. Als Beispiel dient Kapitel 2.2.1, welches die Bestimmung des reduzierenden Gases CO beschreibt. Dieses Verfahren zeigt Querempfindlichkeiten zu weiteren Gasen, denen diese reduzierende Eigenschaften zugrunde liegen (NH_3 , CH_4). Die EC-Sensortechnik zeigt zudem Querempfindlichkeiten bei Gasen mit oxidierenden Eigenschaften, wenn der Sensor darauf ausgelegt ist ein Gas dieser Eigenschaft zu messen. Hierbei ist vor allem auf die gegenseitige Querempfindlichkeit von O_3 und NO_2 hinzuweisen [54] [55].

Bei der Betrachtung von Abbildung 18, und unter der Berücksichtigung, dass MOS nur sehr wenig Werte einschließen, können die gasförmigen Schadstoffe direkt mit der EC-Sensortechnik verknüpft werden. Werden die Ausreißer im unteren Wertebereich von R^2 ausgeschlossen, liegt eine sehr gute Anpassungsgüte für CO vor. Allerdings muss die geringe Datenmenge berücksichtigt werden. Für die vorliegenden Werte kam es offensichtlich nicht zum Einfluss von anderen Gasen, denen ebenfalls eine reduzierende Eigenschaft zugrunde liegen. Bezüglich der Querempfindlichkeit zu oxidierenden Gasen, trifft diese These ebenfalls zu, da sich 50% der R^2 -Werte für Ozon zwischen 0,9032 und 0,9847 befinden. Zusammenfassend lässt sich bezüglich CO und O_3 sagen, dass die Effekte der Querempfindlichkeit keinen drastischen Einfluss auf diese Messungen genommen haben.

Das Boxplot zu NO_2 (Abbildung 18) nimmt dagegen ein deutlich größeren Wertebereich von R^2 ein. Die maximale erreichbare Anpassungsgüte liegt bei 0,8256; der niedrigste Wert ist 0,003. An dieser Verteilung zeigt sich deutlich, dass NO_2 für den Großteil des unteren Interquartilbereichs vom Boxplot zur ECS-Technik in Abbildung 17 sorgt. Folgerichtig liegen den Messdaten vereinzelte Effekte oder Kombinationen aus mehreren negativen Einflüssen zugrunde. Dem grünen Strang der EC-Sensortechnik und dem Schadstoffparameter NO_2 in Abbildung 21 folgend, lassen sich die individuellen Störgrößen erkennen. Da die *Langlebigkeit* bereits ausgeschlossen werden konnte, kann die Annahme getroffen werden, dass Querempfindlichkeiten zu oxidierenden Gasen, Temperatur oder Luftfeuchtigkeit, sowie ein Zusammenschluss der drei Faktoren die vergleichsweise schlechte Datenlage erklärt.

Die Querempfindlichkeit der Referenzinstrumente wird durch das enge Strahlenspektrum oder dem *optischen Filter* weitestgehend eliminiert. Der optische Filter des Chemilumineszenzverfahrens für die Bestimmung von NO_2 entfernt Strahlen unter 600nm, sodass ausschließlich der Strahlengang der Chemilumineszenzantwort von NO den Detektor erreicht [30]. Das festgelegte Strahlenspektrum der Infrarotquelle (4,7m) zur Bestimmung von CO mindert die Querempfindlichkeit von CO_2 und RH [29]. Bei der Bestimmung von O_3 wird ebenfalls eine festgelegte

Wellenlänge von 254,7nm genutzt, um die Empfindlichkeit einzugrenzen [27].

Als *Drift* lässt sich die allmähliche oder plötzliche Änderung des Ansprechverhaltens von Sensoren verstehen. Er ist vor allem eine typische Erscheinungsform von Gassensoren und lässt sich teilweise auf die oben genannten Effekte zurückführen. Durch die Änderung kommt es zur fälschlichen Interpretation einer Konzentrationszunahme oder -abnahme. Die stetige Abweichung vom tatsächlichen Wert wurde sowohl über Tage [56], als auch mehrere Monate [57][58][59] beobachtet. Daraus lässt sich schließen, dass innerhalb des Evaluierungszeitraums (2 Monate) vom AQ-SPEC bestimmte Sensoren ihr Ansprechverhalten änderten. Die Tatsache, dass vom AQ-SPEC keine Kalibrierungen vorgenommen werden (s.a. Kapitel 4.5.1c)) unterstreicht diese Annahme. Um eine Aussage darüber treffen zu können, welche Sensoren vom Drift betroffen sind, müssen die Messreihen genauer untersucht werden. An dieser Stelle sei auch auf die Bedeutsamkeit weiterer Regressionsmetriken hingewiesen. Das AQ-SPEC bestimmt ausschließlich R^2 (s.a. Kapitel 4.5.1g)).

Durch die automatischen *Prüfgas-Kalibrierungen* werden die Referenzmesssysteme in festgelegten Zeitabständen neu justiert und somit vom Drift bereinigt. Die Zwei-Küvetten-Apparatur wechselt beispielsweise ständig zwischen ozonfreiem Probegas, das durch den in Kapitel 3.6.2 angesprochenen Ozonscrubber erzeugt wird, und ozonhaltiger Umgebungsluft.

Die *nicht-lineare Antwort* der MOS für NO_2 und O_3 liegt den grundsätzlichen Eigenschaften von MOS-Sensoren zugrunde und kann abhängig von den Sensorkomponenten auch bei CO beobachtet werden. Sie lässt sich nicht mit den anderen Problematiken auf eine Stufe setzen, da der Effekt durch das fortgeschrittene Verständnis der Sensortechnik zu einfachen Lösungsstrategien und breiter Akzeptanz gefunden hat [25]. In diesem Kontext lässt sich auch die *variierende Basislinie nach dem Neustart* setzen. Wie sehr sich der Umstand der *Sensorantwort von über 5 Minuten* als Problem darstellt, hängt vom Anwendungsrahmen ab. Dies könnte im Sinne der Langzeitbestimmung von Außenluftqualität unproblematisch sein, da gemäß 39.BImSchV die minimale zeitliche Erfassung gegebenenfalls mehr als 5 Minuten betragen kann (Anlage 1A 39.BImSchV).

Da die beschriebenen Problematiken Bestandteil der spezifischen LC-Sensortechniken sind, ergibt sich bezüglich dieser Effekte keine technische Lösung auf Seiten der Referenzmesssysteme.

Um eine fundierte Aussage darüber treffen zu können, weshalb 25% der ECS-Werte in einem Bereich von $0,3301 \leq R^2 \leq 0,001$ liegen, ist es erforderlich, die atmosphärischen Bedingungen zur Zeit der Evaluierung zu betrachten. Unter Umständen kam es innerhalb der zwei Monate

wiederholt zu stark veränderlichen Wetterlagen. Die atmosphärischen Parameter *Temperatur und Luftfeuchtigkeit* sind bekannte Einflussfaktoren von LCS. Sie wurden bereits in zahlreichen Studien untersucht und sind Bestandteil vieler Kalibrierungsmethoden [60] [52] [61]. Sie beeinflussen LCS vor allem dann, wenn starke Schwankungen der Parameter auftreten, oder bestimmte Werte erreicht werden, die außerhalb des Betriebsbereichs liegen. Im Falle von EC-Sensoren können hohe Temperaturen dazu führen, dass die chemischen Reaktionen im Elektrolyten gehindert werden, oder dass er austrocknet [62].

Ähnlich wie die EC-Technik zeigt auch die LS-Technik eine breite Verteilung der Messdaten. Der Interquartilbereich ist etwas nach unten versetzt, woraus sich ableiten lässt, dass die Messdaten grundsätzlich schlechter verteilt sind. Im Bereich der LS-Feinstaubsensoren sorgt hohe Luftfeuchtigkeit für die Überschätzung der Partikelgröße, da hygroskopische Partikel in der Umgebungsluft Wasser binden und die Partikel dadurch vergrößern [63][64]. Folglich detektiert die Photodiode (s.a. Abbildung 8) zu große Werte. Ein weiterer Aspekt der breiten Verteilung der Messdaten ist die diskontinuierliche Durchströmung der Messkammer, aufgrund des nicht regelbaren *Volumenstroms*. Hierdurch werden unter Umständen bestimmte Partikelfractionen nicht erfasst, da sie bei zu geringer Strömung nicht in den Sensor gelangen können. Die Verteilung der Menge an Feinstaubpartikel wird dadurch nicht korrekt abgebildet [65]. Durch den elektrischen Widerstand des Shiney PPD42NS soll dem Abhilfe geleistet werden. Dieses Prinzip kann jedoch nur bei angemessener Temperatur zu einer Minderung des Effekts führen [18].

Referenzmesssysteme werden einer kontinuierlichen *Temperatur- und Drucküberwachung* unterzogen, da die Messergebnisse immer in Bezug zu 20°C und 101,3kPa anzugeben sind. Weiterhin werden die Geräte durch die Parameterüberwachung vor deren negativen Einflüsse geschützt, und gegebenenfalls Kühlungsgeräte eingeschaltet [27][30][29]. Das gravimetrische Referenzmessverfahren beinhaltet die *Wägung*, und bestimmt die Massenkonzentration der beaufschlagten Filter (s.a. Kapitel 3.6.1) mehrmals innerhalb festgelegter zeitlicher Abstände. Hierbei muss eine Temperatur von 19-21°C und eine Luftfeuchtigkeit von 45%-50% eingehalten werden. Systeme, welche den Nachweis der Gleichwertigkeit (Anlage 6B. 39. BImSchV) besitzen, bestimmen die Partikelfractionen nach vorheriger Trocknung des Luftvolumenstroms [26]. Das gravimetrische Referenzmessverfahren besitzt neben der kontinuierlichen Überwachung der Durchströmung einen automatischen *Volumenstromregler*, der dafür sorgt, dass unabhängig von den Umgebungsbedingungen die gleiche Durchflussrate das Messsystem erreicht [26].

Im Hinblick auf Abbildung 17 wird auch bei dieser Sensortechnik deutlich, wie sich das Boxplot zusammensetzt. Es befinden sich 75% der 123 Werte für PM_{10} unterhalb von 0,3437; was sich als schlechte Anpassungsgüte bezeichnen lässt. Für den oberen Teil des Interquartilbereichs der LS-Technik sind die Werte von PM_{25} maßgebend. Sie erreichen gute Werte im oberen Wertebereich von R^2 . Es ist schwierig eine Aussage darüber zu treffen, weshalb sich die Werte der Partikelfractionen so stark unterscheiden. Theoretisch nehmen die beschriebenen Effekte im gleichen Maße Einfluss auf die Parameter. Für eine tiefgreifendere Aussage müssten die Messumgebung und die atmosphärischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Evaluierungen untersucht werden.

Laborevaluierungen

Die Werte der Laborevaluierung in Tabelle 7 müssen kritisch betrachtet werden. Aus den Beschreibungen in Kapitel 4.5.2 lässt sich ableiten, dass die Werte für R^2 kein hinreichendes Abbild über die Leistung der evaluierten Sensoren geben. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Metrik nur unter 20°C und 45% Luftfeuchtigkeit bestimmt wird. Diese Gegebenheiten reizen die Grenzen der entsprechenden Sensortechniken nicht aus. Die großen Unterschiede der Leistungsangabe werden in Tabelle 8 deutlich gemacht. Hierfür wurden die Sensoren gegenübergestellt, welche sowohl im Labor als auch im Feld evaluiert wurden. Im Mittel beträgt die Abweichung von R^2 (Labor) zu R^2 (Feld) 0,3106. Sie nimmt damit fast ein Drittel des Wertebereichs von R^2 ein. Hierdurch soll aufgezeigt werden, dass die herausragenden Werte nicht auf fehlerlose Sensoren zurückzuführen sind, sondern auf die unzureichenden Testbedingungen. Auf die Bedeutung von Laborevaluierungen wird in Kapitel 5.3.2 eingegangen.

Kalibrierungen

Die dargestellte Verteilung von R^2 in Abbildung 20 beschreibt für beide Kalibriermethoden grundsätzlich sehr gute Werte. Für die MLR-Methode wurden insgesamt bessere Werte erfasst. Es lässt sich erkennen, dass komplexere Modelle (RF) nicht zwangsweise bessere Ergebnisse liefern. Einer der Nachteile von RF-Modellen ist ihr nicht einsehbares Entscheidungsmuster innerhalb der Verzweigung der Bäume (s.a. Kapitel 4.6). Die Abläufe in den sogenannten *hidden layers* erreichen mit immer größeren Trainingsdatensätzen sehr große Tiefen und entwickeln sich dadurch zu einer *Black Box*. Unabhängig von der Leistungsbewertung steigt damit auch die nötige Rechenleistung. MLR-Algorithmen sind dagegen einfacher zu verstehen. Ihre Interpretation beruht auf einigen wenigen Koeffizienten (s.a. Kapitel 4.6). Auch wenn der Datensatz bessere Werte für MLR aufzeigt, wird in der Literatur MLR als zu einfach beschrieben, um die komplexen Zusammenhänge der in Abbildung 21 dargestellten Störgrößen zu limitieren [25]. Es wird vermutet, dass die angewendeten MLR-Modelle unter weniger fluktuierenden atmosphärischen Bedingungen trainiert und evaluiert wurden. Für tiefgreifendere Aussagen müssten daher die Gegebenheiten genauer untersucht werden. Weiterhin ist es, bezogen auf alle

Tabelle 8: Vergleich von R^2 bezüglich Labor- und Feldevaluierungen identischer Sensoren

| Modell | Hersteller | Schadstoff | Messtyp | Mittelung | R^2 (Labor) | R^2 (Feld) |
|----------------|-----------------|------------|---------|-----------|---------------|--------------|
| AQY | Aeroqual | O3 | EC | 1min | 0,975 | 0,9581 |
| AQY | Aeroqual | NO2 | EC | 1min | 0,9802 | 0,5051 |
| AQY | Aeroqual | PM10 | LS | 5min | 0,9989 | 0,8351 |
| AQY | Aeroqual | PM25 | LS | 5min | 0,9987 | 0,7626 |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | 5min | 0,9938 | 0,6431 |
| OPC- N3 | Alphasense | PM25 | LS | 5min | 0,9913 | 0,5852 |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | 5min | 0,9954 | 0,4994 |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | 5min | 0,9923 | 0,4586 |
| Atmotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | 5min | 0,9985 | 0,8812 |
| DC1700-PM | Dylos | PM25 | LS | 5min | 0,9543 | 0,6717 |
| LKC-1000S+ | Temptop | PM25 | LS | 5min | 0,9988 | 0,593 |
| M2000 2.Gen. | Temptop | PM25 | LS | 5min | 0,999 | 0,8001 |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | 5min | 0,9989 | 0,8524 |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | 5min | 0,9884 | 0,6506 |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | 5min | 0,995 | 0,1342 |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM25 | LS | 5min | 0,9987 | 0,7679 |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | 5min | 0,999 | 0,7129 |
| Model 2018 | Air Quality Egg | PM25 | LS | 5min | 0,9991 | 0,8458 |
| Air Visual Pro | IQAir | PM25 | LS | 5min | 0,99 | 0,7856 |
| Air A10 - PM | Kunak | PM25 | LS | 5min | 0,9978 | n/a |
| Nubo | Sensirion | PM25 | LS | 5min | 0,9988 | n/a |

Kalibrierungsmodelle, sinnvoll die Regressionsmetriken vor und nach der Kalibrierung zu erstellen. Hierdurch kann eine genauere Aussage getroffen werden, inwieweit die Methoden eine Verbesserung hervorgerufen haben. Grundsätzlich gilt für Kalibriermodelle, dass die Trainingsdaten für verschiedene Schadstoffexpositionen und atmosphärischen Einflüssen repräsentativ sein sollten. Deswegen muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass die Daten nur schwer untereinander vergleichbar sind. Dies hängt mit den unterschiedlichen Evaluierungsbedingungen zusammen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass teilweise gute Anpassungen von LCS zu Referenzinstrumenten festgestellt werden konnten. Insgesamt ergibt sich jedoch eine breite Verteilung der R^2 -Werte für Sensoren, denen keine fortgeschrittene Kalibrierung zugrunde liegt. Hierdurch werden die Aussagen zur schwankenden Leistung von LCS, welche in der Literatur getroffen werden, unterstrichen [4][66]. Durch den Vergleich der Messtechniken wurde gezeigt, dass sich die Eliminierung der Störquellen vor allem auf die grundsätzlichen Unterschiede der Messprinzipien zurückführen lassen. Beispielsweise ist es naheliegend, dass der Einfluss von Temperatur auf ECS im Sinne der Austrocknung des Elektrolyten keine Auswirkungen auf ein Messsystem

haben kann, welches keinen Elektrolyten besitzt. Die messtechnischen Unterschiede sind so fundamental, dass sich die Frage stellt, inwieweit sich die Systeme überhaupt vergleichen lassen. Die Referenzmesssysteme unterliegen zudem strengen Kalibrierbestimmungen, was die Datenqualität zusätzlich verbessert. Hinzukommen die in den einzelnen Normen verankerten Bestimmungen zur Wartung und Überprüfung der Systeme, die tiefgreifende Regeln vorsehen und sich positiv auf die Stabilität und Nutzungsdauer auswirken. Im Sinne der technischen Komplexität und Perfektion ist es ausgeschlossen, dass Low-Cost-Sensoren die Standards von Referenzinstrumenten erreichen, da sie somit ihre Merkmale und Eigenschaften gemäß Kapitel 2.1 verlieren würden. Deswegen wurden bisher nur im geringen Umfang technische Weiterentwicklungen umgesetzt, wie bspw. Lufttrockner zur Minimierung des Effekts von Luftfeuchtigkeit auf hygroskopische Substanzen [67]. Zur Erhaltung der Alleinstellungsmerkmale stehen deswegen zur Verbesserung der Datenqualität die besprochenen Kalibriermethoden im Vordergrund.

Es ist außerdem wichtig anzumerken, dass sich die vorliegenden Daten aus unterschiedlichen Evaluierungsbedingungen ergeben, und daher nur schwer untereinander vergleichbar sind. Dies hängt vor allem mit der Tatsache zusammen, dass einzelne Sensoren unter Umständen bessere oder schlechtere Ergebnisse geliefert hätten, wären sie an anderen Orten und zu anderen Zeiten evaluiert worden. Diese Anmerkung gilt auch für die Kalibrierungsmethoden. Auf die Bedeutung einheitlicher Evaluierungen und die Rolle der verschiedenen Leistungsmetriken wird im Unterkapitel 5.3 näher eingegangen.

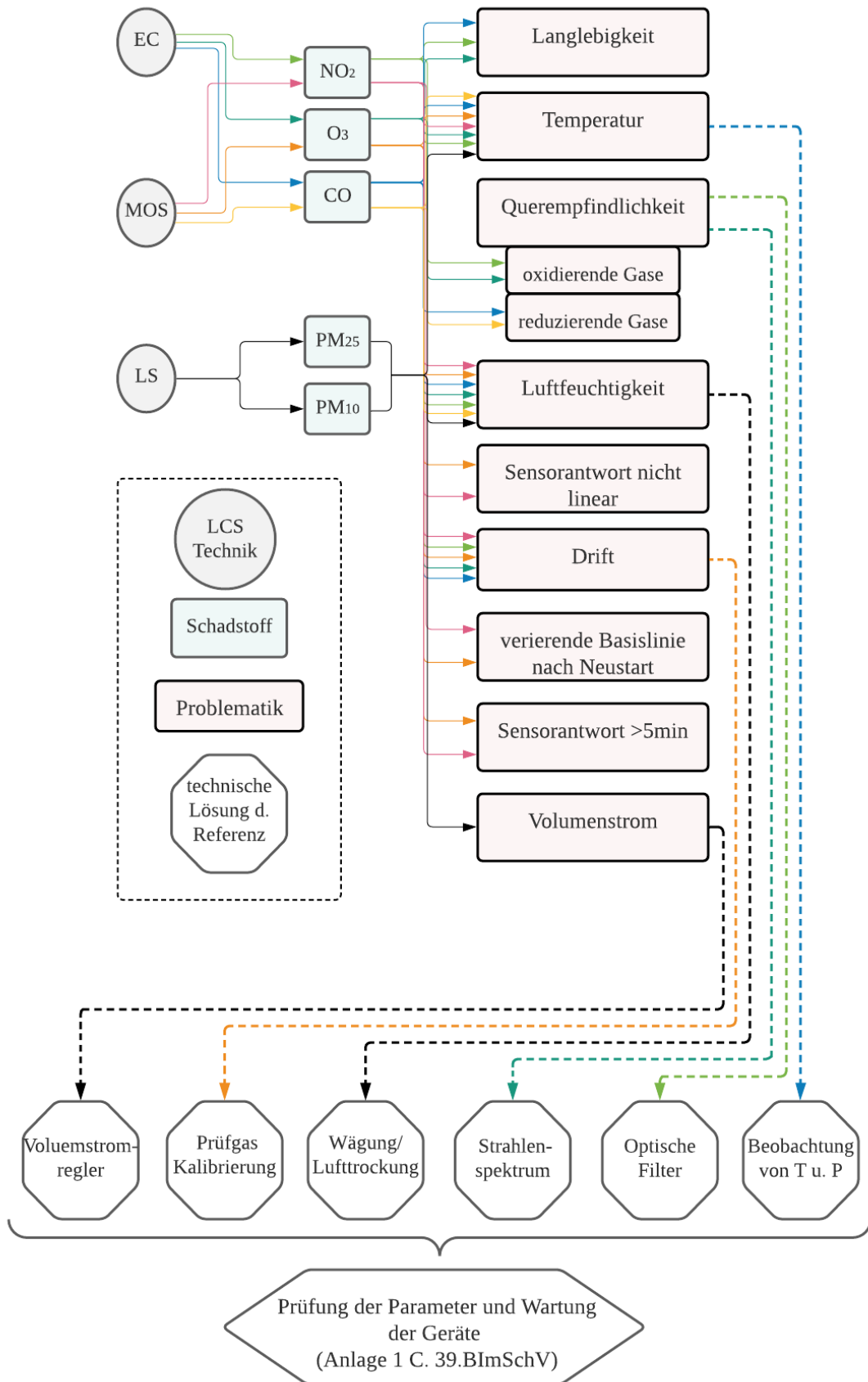


Abbildung 21: Störgrößen von LCS-Messtechniken in Verbindung mit dem zu detektierenden Schadstoff, sowie die Lösung der Referenzmesstechnik (Eigene Darstellung)

5.2. Rechtliche Ebene

Zur Einordnung des rechtlichen Aspekts bezüglich der Möglichkeiten von LCS wird zunächst im Hinblick auf Kapitel 3 die 39.BImSchV analysiert und in einem weiteren Schritt die Möglichkeiten von LCS dargelegt.

5.2.1. Kritische Beleuchtung der 39.BImSchV

Das Ergebnis der tiefgreifenden Anforderungen an Referenzmesssysteme sind hoch entwickelte Messeinrichtungen mit sehr guter Datenqualität. Aus den Beschreibungen der Systeme (s.a. Kapitel 3.6) und den Standortbestimmungen lässt sich jedoch auch schließen, dass sie schwer sind, und viel Platz einnehmen. Aufgrund ihrer physischen Eigenschaften können sie daher nur in bestimmten Bereichen aufgestellt werden [4]. Ein weiterer Aspekt der geringen Verbreitung sind ihre Kosten. Abgesehen von den einzelnen Kosten der Messinstrumente, unterliegen die Stationen einem umfangreichen Wartungs- und Überprüfungskatalog [26][30][27][29]. Als Grund zur Prüfung wären hier die Katalysatoren bei der Bestimmung von NO_2 zu nennen, welche ständig ihren Umwandlungsgrad ändern [30]. Hierfür, und für eine Vielzahl weiterer Aufgaben, wird geschultes Personal benötigt. Zusätzliche Personalkosten ergeben sich durch die Aufgaben in den Laboratorien zur Bestimmung der Feinstaubkonzentration durch Wägung, und dem grundsätzlichen Monitoring und Aufbereiten der Daten. Unter diesen Umständen liegen nur an wenigen Orten genaue Daten vor, sodass lokale Emissionen nur schwer erfasst werden können. Neben der räumlichen Datendichte fehlt teilweise die zeitliche Datenverfügbarkeit [4][5]. So kommt es beispielsweise bei Feinstaubmessungen zur Verzögerung von Messereignis und Bestimmung der Konzentration, aufgrund der Wägung.

Die Bedeutsamkeit von alternativen Überwachungsstrategien zeigt sich zum Beispiel bei Evaluierungen zu Geschwindigkeitsbeschränkungen oder Dieselfahrverboten. Nur durch engmaschige Sensornetze kann überprüft werden, inwieweit entsprechende Konzepte die Schadstoffemissionen in bestimmten Bereichen positiv verändert haben. Im Sinne des Gesundheitsschutzes lässt sich anhand der Empfehlung der WHO ebenfalls auf eine engere räumliche Verteilung von Messstationen schließen. Concas et al. [25] geben an, die Institution vertrete die Annahme, dass eine Messstation pro km^2 nötig wäre. Gemäß Kapitel 3.3 gibt die 39.BImSchV lediglich für den *städtischen Hintergrund* einige km^2 als repräsentativ an, ohne dies weiter auszuführen. Weiterhin wurde festgestellt, dass die 39.BImSchV die Einwohnerzahl als Grundlage für die Anzahl der Messstationen nimmt. Demnach bezieht sich eine Messstation, abhängig von der Beurteilungsschwelle, auf 250.000 Einwohner (Anlage 5 A. 39.BImSchV). Folgerichtig ist von der 39.BImSchV keine flächendeckende Überwachung der Luftqualität vorgesehen. Vielmehr fokussiert sie sich auf Orte an denen eine Vielzahl an Bürgerinnen und Bürger zusammenkommen. Dieser Ansatz ist nachvollziehbar und richtig, zusätzlich sollte die Luftqualität jedoch

auch in Gebieten bestimmt werden, wo sich nur vereinzelt oder keine Siedlungen befinden. Schließlich sind auch dort Quellen von Schadstoffemissionen zu beobachten. Durch die höhere räumliche Auflösung könnten diese erfasst werden und entsprechende Maßnahmen getroffen werden.

Dieser Ansatz soll durch die in Tabelle 4 angegebenen *orientierenden Messungen* verfolgt werden. Hierbei kommen in der Regel Passivsammler zum Einsatz. Deren größter Vorteil ist der stromlose Betrieb und die benutzerfreundliche Handhabung. Zudem sind sie klein und nehmen nicht viel Platz ein. Ihre Kosten sind vergleichsweise gering. Aufgrund der Merkmale kann zwar die räumliche Auflösung erhöht werden, allerdings lassen sich keine Schadstoffkonzentration innerhalb kurzer Zeiträume erfassen. Passivsammler sind aufgrund ihrer Konzipierung ausschließlich in der Lage kumulative Konzentrationswerte anzugeben. Trotz ihrer Zertifizierung kommt es zu Querempfindlichkeiten und Störfaktoren atmosphärischer Bedingungen [68]. Eine zusätzliche Anwendung zur Erfassung von hohen räumlichen und zeitlichen Schadstoffwerten beschreibt die 39.BImSchV durch die Modellrechnungen. Abgesehen davon, dass in diesen Fällen keine tatsächliche Messung vorgenommen wird, werden die Modelle vor allem für Vorhersagen angewendet. Für die Entwicklung der Modelle und Klassifizierung der Eingabedaten ist Fachpersonal von Nöten. Selbst unter dieser Voraussetzung kann es zu signifikanten Fehlern und lückenhafter Überwachung kommen [69].

5.2.2. Potential von LCS im Hinblick auf die 39.BImSchV

Aus denen in Kapitel 2 vorgestellten Merkmalen von LCS lässt sich schließen, dass der Kostenfaktor und die Beschränkungen im Sinne der Standortbestimmung gemäß 39.BImSchV wegfallen. Konkrete Bestimmungsfaktoren, wie beispielsweise die Sichtbarkeit in der öffentlichen Umgebung, wären aufgrund der geringen Größe keine Beschränkung. Grundsätzlich ist es möglich, die gesamte öffentliche Infrastruktur als potenzielle Standorte zu betrachten. Hierbei besteht auch die Möglichkeit Sensoren an Müllwägen, Bussen oder weiteren Fahrzeugen öffentlicher Institutionen zu montieren. Die Wartungskosten der Systeme halten sich aufgrund ihrer geringen Komplexität im Rahmen der kommunalen Finanzierungsmöglichkeiten. Insgesamt kann dadurch die Anzahl der eingesetzten Geräte erhöht werden. Die höhere Messfrequenz befähigt Expert:innen zu schnellerem Handeln bei Überschreitungen von Grenzwerten. Hieraus könnten zukünftige Smart City Konzepte einen großen Vorteil ziehen. Durch die Vernetzung verschiedener Datenströme wären Luftdaten ein wichtiger Erkenntnisgewinn, um beispielsweise automatisch kostenlose Bahntickets zur Verfügung zu stellen, wenn bestimmte Schadstoffwerte erreicht werden. Eine weitere Möglichkeit besteht in der intelligenten Verkehrssteuerung, wo Fahrzeugströme aufgrund zu hoher Emissionen umgeleitet werden.

Durch die enge Verteilung der LCS können Emissionen am Ort ihres Entstehens detektiert werden. Gebiete die nicht durch die 39.BImSchV abgedeckt sind, werden dadurch zukünftig

überwacht. Innerhalb von Städten können, durch den Einsatz im Radius von wenigen Kilometern, unterschiedliche Luftverschmutzungsgradienten besser erfasst werden. Im Sinne der WHO wäre es dadurch einfacher die Quellen und Trends der Schadstoffbelastung zu detektieren, woraus sich bessere Entscheidungen für Umwelt und Gesundheit ableiten lassen.

Bei der Beschreibung des Potenzials von LCS ist es entscheidend, die kritische Beleuchtung der Sensortechniken einzubeziehen. Demnach ist es nicht sinnvoll Referenzmesssysteme durch LCS zu ersetzen. Letztere besitzen nicht den Anspruch die Datenqualität der zertifizierten Messstationen zu erreichen. Vielmehr lassen die o.g. Punkte auf eine Kombination beider Systeme schließen. Solche Hybridlösungen könnten sich gegenseitig unterstützen. LCS würden die Lücke der spärlichen Überwachung füllen. Im Zusammenhang mit einem stringenten Evaluierungsprogramm (s.a. Kapitel 5.3) wäre bereits eine gute Grundlage für hohe Datenqualität gegeben. Die grundsätzliche Qualitätskontrolle könnte mit den Referenzinstrumenten erfolgen. Kommt es zur Minderung der Genauigkeit von Sensornetzen oder einzelnen LCS können sich die Sensoren durch die breite Vernetzung abhängig voneinander kalibrieren (Kreuzkalibrierung).

Die Untersuchung der 39.BImSchV zeigt, dass vor allem im Hinblick auf die Überwachungsstrategie ein Mangel an hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung besteht. Hierbei könnten LCS als Unterstützung dienen. Da ausschließlich zertifizierte Messsysteme in Betracht gezogen werden können, ist es aktuell ausgeschlossen, dass LCS unter rechtlichen Verpflichtungen Anwendung finden. Aus diesem Grund ist es wichtig, einheitliche Zertifizierungssysteme für LCS zu schaffen. Hierbei müssen die im Folgenden näher besprochenen Aspekte von Evaluierungen Verwendung finden.

5.3. Grundsätzliche Rahmenbedingungen von Evaluierungen

Beim Zusammentragen der einzelnen Publikationen wurde anhand der unterschiedlichen Kategorien und Elemente der Datenbank A erkannt, dass die Evaluierungen von LCS sehr unterschiedlich ausfallen. Die großangelegten Evaluierungsprogramme, welche in Kapitel 4.2 beschrieben wurden, unterstreichen diese Erkenntnis. Da es keine einheitlichen Vorgaben gibt, fehlen auch von Herstellerseite Informationen zur Fehleranfälligkeit und der grundsätzlichen Datenqualität. Endnutzer:innen fehlt damit die Information wie potentielle LCS unter bestimmten Bedingungen performen [4]. Das größte Hindernis der Einsatzmöglichkeiten von LCS ist die nicht vorhandene Zertifizierung, und der damit zusammenhängende Ausschluss aus der 39.BImSchV. Um die Zertifizierung voranzutreiben, müssen die Systeme nach einheitlichen Maßstäben evaluiert werden. Im weiteren Verlauf soll anhand der Analyse der Datenlage herausgearbeitet werden, welche Faktoren bei der Leistungsangabe von LCS bedeutungsvoll sind.

5.3.1. Rolle von unterschiedlichen Regressionsmetriken

Die Regressionsmetriken gehören zu den wichtigsten Angaben bei der Bewertung von LCS. Wie bereits im vorherigen Kapitel festgestellt, ist die Anpassungsgüte die vorherrschende Regressionsmetrik der zusammengetragenen Datensätze. Im Zusammenhang mit Kapitel 4.3 wird im Folgenden auf die Rolle der Regressionsmetriken bei Evaluierungen von LCS eingegangen.

Für eine weitere Darstellungsform von R^2 (s.a. Gleichung 11) wird MSE (Mean Squared Error) eingeführt, und wie folgt beschrieben [25]:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{si} - y_{ref_i})^2 \quad (15)$$

Unter der Berücksichtigung von Gleichung 15 und 11 folgt dann für R^2 [25]:

$$R^2 = 1 - \frac{n \cdot MSE}{TSS} \quad (16)$$

Da $RMSE = \sqrt{MSE}$ gilt, wird deutlich, dass $RMSE$ und R^2 in enger Beziehung stehen. Beide Metriken überschätzen, vor allem bei hohem Rauschen der Daten, Fehler im Zusammenhang mit Ausreißern. Dies lässt sich auf die Quadrierung der Abweichungen zurückführen. Im Gegensatz dazu werden Daten mit geringem Rauschen überbewertet [25]. Bei LCS-Messwerten kann es, vor allem innerhalb der Aufwärmphase, zu Ausreißern kommen [5]. Bei der Verwendung dieser Metriken müssen daher etwaige Phänomene berücksichtigt werden.

Der signifikante Unterschied zwischen $RMSE$ und R^2 besteht darin, dass $0 \leq R^2 \leq 1$ gilt, und die Metrik dadurch einfacher und universeller interpretiert werden kann. $RMSE$ hingegen gibt eine genauere Aussage bezüglich der durchschnittlichen Abweichungen der tatsächlichen Werte des Datensatzes. Schmitz et al. [70] erfassten in ihren Modellevaluierungen ein R^2 von 0,7; was durchaus als hinreichende Anpassungsgüte beschrieben werden kann. Allerdings wurde für das gleiche Modell ein $RMSE$ von mehr als 7ppb für O_3 erkannt. Im Zusammenhang mit dem Datensatz lässt dieser Wert auf ein wesentlich ungenaueres Modell schließen, als ein alleinstehendes R^2 von 0,7 implizieren würde.

Das konträre Modell zu $RMSE$ und R^2 zeigt MAE in Gleichung 13. MAE verteilt die individuellen Fehler der Messreihe gleichmäßig und unterbewertet dadurch Ausreißer und rauschende Daten [25].

Wie sich aus den Erklärungen ableiten lässt, ist keine der beobachteten Metriken zu Bestimmung der Leistung von LCS einwandfrei. Vielmehr ergänzen sie sich. Ob ein Kalibriermodell oder LCS qualifiziert ist sollte daher nicht nur an einer Regressionsmetrik ausgemacht werden. Es ist wichtig mindestens R^2 und $RMSE$ in die Sensorevaluierung einzubeziehen [66][57][70]. Die Literaturrecherche zeigt jedoch, dass sich viele Evaluierungen ausschließlich auf R^2 beziehen. Hier sei vor allem auf die Evaluierungen von AQ-SPEC hingewiesen (s.a. Kapitel 4.5.1g) und 4.5.2j)

5.3.2. Evaluierungszeiträume und örtliche Gegebenheiten

Evaluierungszeiträume

Die Veränderungen der klimatischen Bedingungen innerhalb eines Jahres sind ausschlaggebend für den Einfluss der beschriebenen negativen Effekte der atmosphärischen Parameter (s.a. Kapitel 5.1). Beispielsweise können jahreszeitliche Veränderungen hohe Windgeschwindigkeiten fördern und Temperaturschwankungen innerhalb weniger Tage hervorrufen. Als Ergebnis kommt es zu Änderungen in der Ausbreitung der Schadstoffe aufgrund von breiteren atmosphärischen Grenzschichten [7]. Aus diesem Grund muss eine weitere, bisher noch nicht erwähnte, Kategorie der Datenbank A in die Analyse einbezogen werden, der Zeitraum. Unter ihm lässt sich jene Zeitspanne verstehen, in welcher der parallele Messvorgang von LCS und Referenzmesssystemen abläuft. In Kapitel 4.5.1b) wurde bereits angemerkt, dass das AQ-SPEC einheitliche Zeiträume (2 Monate) für ihre Evaluierungen vorsieht. Anhand von Abbildung 22, welche eine Übersicht der Zeiträume der vom AQ-SPEC unabhängigen Studien zeigt, lässt sich erkennen, dass sich auf einen Datensatz von 113 Wertereihen 10 verschiedene Zeiträume ergeben. Die einbezogenen Studien evaluieren Sensoren und deren Kalibrierungsmodelle also nach sehr unterschiedlichen zeitlichen Gegebenheiten.

Daraus folgt, dass keine Grundlage geschaffen werden kann, die einzelnen Anpassungsmöglichkeiten untereinander zu vergleichen, da die Angabe der Leistung auf verschiedene Zeiträume und damit unterschiedliche Umweltbedingungen zurückfällt. Als wenig sinnvoll können die Evaluierungen angesehen werden, die nur wenige Tage andauern, da unter diesen Umständen bspw. nicht mal unterschiedliche Verkehrsflüsse an verschiedenen Wochentagen berücksichtigt werden können. Ebenso muss Kritik an der Leistungsangabe individueller Modelle erfolgen, da eine Kalibrierung, welche über einen geringen Zeitraum evaluiert worden ist, möglicherweise eine schlechtere, oder bessere Leistung abgeben haben könnte als ursprünglich angenommen wurde. Eine Publikation, die diesen Hintergrund beleuchtet, und die Argumentation unterstreicht sind Vajs et al. [14]. Zauli-Sajani et al. [13] unterscheiden lediglich zwischen der Leistungsangabe im Sommer und Winter. Alle weiteren Studien treffen teilweise die Angabe, aus welchen Monaten die Trainingsdaten stammen und in welchen Monaten die Evaluierung

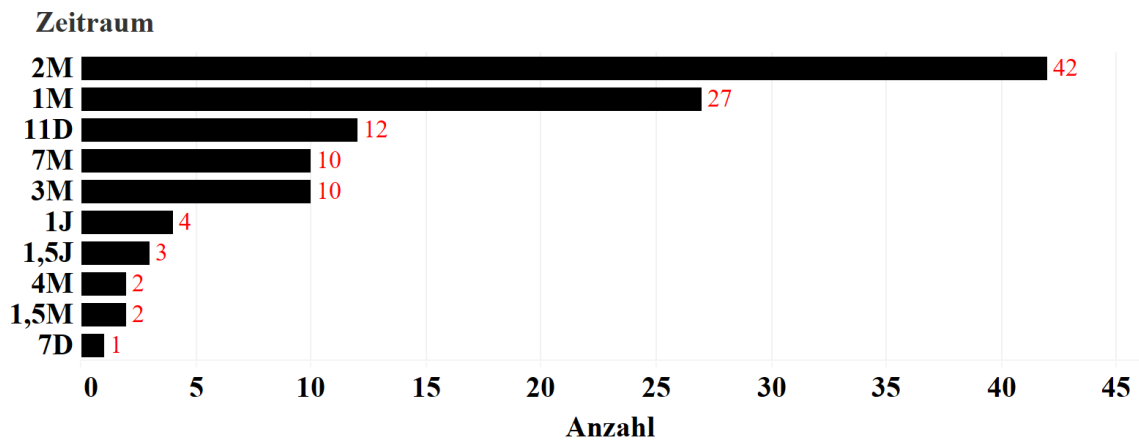


Abbildung 22: Anzahl der beobachteten Zeiträume, D:Tage, M:Monat(e), J:Jahr(e)

erfolgte. Sie verfolgen jedoch keine mehrmonatige Trainings- bzw. Evaluierungsstrategie.

Für die Leistungsbewertung von LCS ist es von Bedeutung alle jahreszeitlichen Veränderungen einzubeziehen. Der Evaluierungszeitraum von LCS sollte daher ein Jahr betragen.

Örtliche Gegebenheiten

Im Hinblick auf die veränderlichen atmosphärischen Bedingungen, und die damit zusammenhängenden Wirkungen auf die Schadstoffexpositionen, stehen die örtlichen Gegebenheiten im engen Zusammenhang mit dem Zeitraum. Hierbei sei auf die lokalen Typisierungen hingewiesen, wie zum Beispiel *ländlicher Hintergrund* oder *verkehrsnahe* (s.a. Kapitel 3). Die Schadstoffbelastungen solcher Gebiete variieren stark [59]. Daraus ergeben sich Veränderungen für weitere Faktoren wie Querempfindlichkeit oder Einfluss von Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Werden einzelne Kalibrierungsmodelle untereinander verglichen, die hinsichtlich der lokalen Klassifizierungen unterschiedlich sind, kann streng genommen keine Aussage darüber getroffen werden, welches der Modelle das bessere darstellt. Zusätzlich müssen überregionale Gegebenheiten dokumentiert werden. Beispielsweise können aufgrund der Topographie in bestimmten Regionen höhere *RH*-Werte beobachtet werden als in anderen [7], wengleich die lokalen Gegebenheiten als *ländlicher Hintergrund* zu klassifizieren wären.

Das AQ-SPEC evaluiert zwar alle Sensoren unter den gleichen örtlichen Gegebenheiten (s.a. 4.5.1e), trifft aber keine Aussagen über lokale Faktoren wie beispielsweise *verkehrsnahe* oder *städtischer Hintergrund*. Ebenso wenig wird Aufschluss auf überregionale Verhältnisse gegeben. Gleiches gilt für Astudillo et al. [71], die lediglich anmerken, dass es sich um eine

städtisches Gebiet handelt. Weitere Publikationen weisen auf den Einfluss lokaler Schadstoffquellen hin [12], oder geben hinweise auf verkehrsreiche Kreuzungen am Ort der Evaluierung [72]. Zauli-Sajani et al. [13] treffen hingegen genaue Angaben bezüglich der drei verschiedenen Kategorien: *städtischer Hintergrund*, *städtisch verkehrsnah*, und *vorstädtisch verkehrsnah*. Alle weiteren Publikationen machen diesbezüglich nur teilweise Angaben, oder evaluieren unter sehr unkonventionellen Bedingungen [73].

Die Analyse der Publikationen zeigt, dass es im Hinblick auf die Störfaktoren wichtig ist, Evaluierungen unter den gleichen örtlichen Gegebenheiten durchzuführen. Bestenfalls sollten LCS unter den Bedingungen evaluiert werden, wo sie zukünftig Verwendung finden. Wird zusätzlich die Leistung von fortgeschrittenen Kalibrierungsansätzen bewertet, ist es wichtig, dass die Leistungsangabe der Modelle immer in Bezug zu den zugrundeliegenden Gegebenheiten erfolgt. Die Analyse zeigt zwar, dass vereinzelt Angaben getroffen werden, allerdings nicht nach festgelegten Kriterien. Für zukünftige Evaluierungen sollten Charakterisierungen wie *städtischer Hintergrund*, *städtisch verkehrsnah* usw. fester Bestandteil sein.

Verknüpft mit den örtlichen Gegebenheiten sollen an dieser Stelle auch die Evaluierungen im Labor angesprochen werden. Tabelle 8 zeigt zwar deutlich, dass sich signifikante Unterschiede zwischen den Evaluierungsformen ergeben, die Laborevaluierung ist dennoch ein wichtiges Glied in der Leistungsbewertung. Hier können Sensoren unter festgelegten Bedingungen analysiert werden. Daraus lassen sich sensortechnische Grenzen besser verstehen, als unter den komplexen Vorgängen im Feld [5]. Das AQ-SPEC hat diesen Grundsatz nicht ausgeschöpft, da sich die Angabe der Leistungsmetrik ausschließlich auf die Mittelwerte der Messreihen bei 20°C und 45% RH beziehen. Es ist es jedoch sinnvoll, im Hinblick auf Kapitel 5.3.1, verschiedene Leistungsmetriken bei sich verändernden Bedingungen anzugeben. Prinzipiell wird dieser Ansatz vom AQ-SPEC verfolgt (s.a. Kapitel 4.5.2f), allerdings veröffentlicht die Institution bezüglich der 5 Stufen nur qualitative Aussagen. Das gleiche gilt für 4.5.2 g). Wichtig wäre es für jede einzelne Stufe Leistungsmetriken zu erstellen. Dadurch können einzelne Sensormodelle besser verglichen werden. Der zeitliche Rahmen von 900 Minuten (s.a. 4.5.2b) und die Voraussetzung, dass immer 3 Sensoren des gleichen Modells getestet werden (s.a. 4.5.2a), wird als sinnvoll angesehen. Hierdurch kommen zum einen technische Fehler der Sensortechnik zum Vorschein, und die 5 Testphasen lassen sich innerhalb der veranschlagten Zeit durchführen. Unter der Berücksichtigung der oben genannten Erweiterungen lässt sich das Vorgehen von AQ-SPEC als umfassendes Modell für Laborevaluierungen beschreiben. Um weitere Aussagen treffen zu können ist es notwendig weitere Daten aus Laboratorien zu untersuchen. Aufgrund der Tatsache, dass keine der vom AQ-SPEC unabhängigen Publikationen Laborevaluierungen durchgeführt hat, lässt sich schließen, dass grundsätzlich zu wenig Sensoren unter festgelegten Bedingungen getestet werden.

6. Fazit und Ausblick

Das Ziel der Bachelorarbeit war es die Möglichkeiten und Grenzen von LCS festzustellen. Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurden zahlreiche Studien untersucht, welche die Leistung dieser Sensoren anhand von Regressionsmetriken bestimmen. Aus diesen Evaluierungen konnten, neben der Feststellung der Leistung, weitere Erkenntnisse abgeleitet werden, welche für die Beantwortung der Forschungsfrage bedeutungsvoll sind. Weiterhin wurden die Möglichkeiten anhand der Untersuchung der 39.BImSchV herausgearbeitet.

Die Ergebnisse bezüglich der Regressionsmetrik R^2 zeigen, dass die Leistung von LCS im Vergleich zu Referenzmesssystemen teilweise sehr gute Werte erreichen. Insgesamt nehmen die Daten allerdings einen großen Wertebereich ein, da LCS aufgrund zahlreicher Einflussfaktoren nicht konsequent in der Lage sind hinreichende Messergebnisse zu liefern. Die Datenqualität kann jedoch durch fortgeschrittene Kalibrierungsmodelle verbessert werden. Diese Tatsache unterstreicht die Bedeutsamkeit von Kalibrierungsstrategien. Für die Zusammenfassung der verschiedenen Werte der Regressionsmetriken ist es wichtig anzumerken, dass die Leistungsbeurteilung unabhängig von den Evaluierungsbedingungen erfolgte. Folgerichtig könnten einzelne LCS oder Kalibrierungsmodelle bessere oder schlechtere Werte liefern, wären sie an anderen Orten und zu anderen Zeiten evaluiert worden.

Diese Erkenntnis ist ein wichtiger Kritikpunkt an dem aktuellen Evaluierungsvorgehen zu LCS und stellt die Forderung, zukünftige Evaluierungen nach einheitlichen Maßstäben durchzuführen. Nur so können Endnutzer auf die Leistungsangaben der Hersteller vertrauen und die Sensorauswahl entsprechend ihrem Anwendungsrahmen treffen. Im Zusammenhang mit der Forderung nach einheitlichen Evaluierungsrahmen sei auch auf die fundamentalen Unterschiede der Messprinzipien von Referenzsystemen und LCS hingewiesen. Letztere besitzen nicht den Anspruch die Datenqualität der zertifizierten Systeme zu erreichen. Vielmehr sollten sie als Unterstützung und ggf. partieller Ersetzung der Referenzmessstationen eingesetzt werden. Im Hinblick auf die 39.BImSchV ist es von großer Bedeutung, eine höhere zeitliche und räumliche Datenerfassung zu gewährleisten. Entscheidend ist hierbei ein allumfassender und einheitlicher Evaluierungsrahmen.

Dieser Ansatz wird auch von der europäischen Union und der Arbeitsgruppe CEN/TC 264/WG 42 verfolgt. Aktuell erarbeitet diese ein Dokument, welches die Rahmenbedingungen zur Leistungsbewertung von LCS festlegen soll. Hierbei wird sich ausschließlich auf Sensoren bezogen, welche die in der Richtlinie 2008/50/EG festgelegten gasförmigen Verbindungen detektieren. Die Maßgaben im Hinblick auf die Datenqualität beziehen sich dabei auf orientierende Messungen (s.a. Tabelle 4) und nicht auf ortsfeste Messungen, wie sie den untersuchten Evaluierungen

zugrunde liegen. Mit dem Abschluss dieser Arbeit steht das Dokument noch *unter Genehmigung*, weshalb es nicht möglich war in Kapitel 5.3 auf Einzelheiten einzugehen. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass die Festlegung von einheitlichen Bewertungskriterien und die damit zusammenhängende Anerkennung von LCS in der Richtlinie 2008/50/EG zu einem Paradigmenwechsel in der Überwachung der Außenluftqualität führen wird. Hierdurch eröffnet sich für LCS ein breites Feld an Einsatzmöglichkeiten.

Literatur

- [1] World Health Organization (WHO). *Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease*. World Health Organization, 2016.
- [2] Alastair Lewis and Peter Edwards. Validate personal air-pollution sensors. *Nature*, 535(7610):29–31, jul 2016. doi:10.1038/535029a.
- [3] OECD. *The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution*. 2016. URL: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264257474-en>, doi:<https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264257474-en>.
- [4] Nuria Castell, Franck R. Dauge, Philipp Schneider, Matthias Vogt, Uri Lerner, Barak Fishbain, David Broday, and Alena Bartonova. Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99:293–302, feb 2017. doi:10.1016/j.envint.2016.12.007.
- [5] Alastair Lewis, W. Peltier, and Erika von Schneidemesser. Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications. 05 2018.
- [6] United States Environmental Protection Agency (EPA). Air sensor guidebook. June 2014. URL: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=519616.
- [7] Haitao Zhou, Yueming Yu, Xuan Gu, Yun Wu, Mei Wang, Hao Yue, Jiale Gao, Ruoyuan Lei, and Xinlei Ge. Characteristics of air pollution and their relationship with meteorological parameters: Northern versus southern cities of china. *Atmosphere*, 11(3), 2020. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/3/253>, doi:10.3390/atmos11030253.
- [8] Federico Karagulian, Maurizio Barbieri, Alexander Kotsev, Laurent Spinelle, Michel Gerboles, Friedrich Lagler, Nathalie Redon, Sabine Crunaire, and Annette Borowiak. Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, 10(9):506, aug 2019. doi:10.3390/atmos10090506.
- [9] Ltd. Nova Fitness Co. *Laser PM2.5 Sensor specification Product model: SDS011 Version: V1.3*. URL: <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/SDS011-DATASHEET.pdf>.
- [10] Ltd Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co. *MQ131 Ozone Gas Sensor (High Concentration) Manual Version: 1. 4*. URL: <https://www.winsen-sensor.com/>

d/files/PDF/SemiconductorGasSensor/mq131(high-concentration)-ver1_4-manual.pdf.

- [11] Alphasense. *NO2-B43F Nitrogen Dioxide Sensor 4-Electrode Technical Specification Version July 2019*. URL: <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/NO2-B43F.pdf>.
- [12] Wen-Cheng Vincent Wang, Shih-Chun Candice Lung, and Chun-Hu Liu. Application of machine learning for the in-field correction of a PM2.5 low-cost sensor network. *Sensors*, 20(17):5002, sep 2020. doi:10.3390/s20175002.
- [13] Stefano Zauli-Sajani, Stefano Marchesi, Claudia Pironi, Carla Barbieri, Vanes Poluzzi, and Annamaria Colacci. Assessment of air quality sensor system performance after relocation. *Atmospheric Pollution Research*, 12(2):282–291, feb 2021. doi:10.1016/j.apr.2020.11.010.
- [14] Ivan Vajs, Dejan Drajić, Nenad Gligorić, Ilija Radovanović, and Ivan Popović. Developing relative humidity and temperature corrections for low-cost sensors using machine learning. *Sensors*, 21(10):3338, may 2021. doi:10.3390/s21103338.
- [15] Ekbert Hering und Gert Schönfelder. *Sensoren in Wissenschaft und Technik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. doi:10.1007/978-3-658-12562-2.
- [16] Gerhard Wiegleb. *Gasmesstechnik in Theorie und Praxis*. Vieweg+Teubner Verlag, April 2016. URL: https://www.ebook.de/de/product/25501826/gerhard_wiegleb_gasmesstechnik_in_theorie_und_praxis.html.
- [17] Doris Schmitt-Landsiedel Thomas Tille. *Mikroelektronik*. Springer-Verlag GmbH, 2006. URL: https://www.ebook.de/de/product/25604236/thomas_tille_doris_schmitt_landsiedel_mikroelektronik.html.
- [18] Michaël Canu, , Boris Gálvis, and Malika Madelin. What does the shinyei PPD42ns low-cost dust sensor really measure? *International Journal of Environmental Science and Development*, 12(1):1–9, 2021. doi:10.18178/ijesd.2021.12.1.1310.
- [19] United States Environmental Protection Agency EPA. Peer review and supporting literature review of air sensor technology performance targets. *National Service Center for Environmental Publications (NSCEP)*, 2018. URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=P100VMSR.txt>.
- [20] und nukleare Sicherheit Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz. Luftreinhaltung - worum geht es?, February 2020. URL: <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-verkehr/luftreinhaltung/kurzinfo/>.

- [21] Europäischer Gerichtshof (EUGH). Von 2010 bis 2016 hat Deutschland die Grenzwerte für Stickstoffdioxid (NO₂) systematisch und anhaltend überschritten. *Pressemitteilung*, June 2021. URL: <https://curia.europa.eu/jcms/upload/docs/application/pdf/2021-06/cp210094de.pdf>.
- [22] Umweltbundesamt. Luftmessnetz: Wo und wie wird gemessen?, 07 2019. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luftmessnetz-wo-wie-wird-gemessen>.
- [23] Silke Kersting. Luftqualität in Deutschland hat sich auch 2020 verbessert, 02 2021. URL: <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/uba-daten-luftqualitaet-in-deutschland-hat-sich-auch-2020-verbessert/26917214.html?ticket=ST-11544300-Shf3bazCAv7250deeHxM-ap3#:%7E:text=Insgesamt%20sammelt%20und%20bewertet%20das,deutschlandweit%20mehr%20als%20500%20Messstationen>.
- [24] Dipl.-Ing. Dieter Eickelpasch; Dipl.-Ing. Georg Eickelpasch. Feststellung und bewertung von Immissionen - Leitfaden zur Immissionsüberwachung in Deutschland -. Technical report, Umweltbundesamt, 2004. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2701.pdf>.
- [25] Francesco Concas, Julien Mineraud, Emil Lagerspetz, Samu Varjonen, Xiaoli Liu, Kai Puolamäki, Petteri Nurmi, and Sasu Tarkoma. Low-cost outdoor air quality monitoring and sensor calibration: A survey and critical analysis. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 17(2), May 2021. doi:10.1145/3446005.
- [26] DIN EN 12341:2014-08, Außenluft- gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM(index)10- oder PM(index)2,5-massenkonzentration des Schwebstaubes Deutsche Fassung EN_12341:2014, 2014. doi:10.31030/2076304.
- [27] DIN EN 14625:2012-12, Außenluft- messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Ozon mit Ultraviolett-Photometrie Deutsche Fassung EN_14625:2012, 2012. URL: <https://dx.doi.org/10.31030/1852619>, doi:10.31030/1852619.
- [28] Ghenadii Korotcenkov. *Handbook of Gas Sensor Materials*. Springer New York, 2013. URL: https://www.ebook.de/de/product/20332458/ghenadii_korotcenkov_handbook_of_gas_sensor_materials.html.
- [29] DIN EN 14626:2012-12 Außenluft - messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Kohlenmonoxid mit nicht-dispersiver Infrarot-Photometrie Deutsche Fassung EN_14626:2012, 2012. doi:10.31030/1852620.

- [30] DIN EN 14211:2012-11, außenluft_- messverfahren zur bestimmung der konzentration von stickstoffdioxid und stickstoffmonoxid mit chemilumineszenz deutsche fassung EN_14211:2012, 2012. doi:10.31030/1852617.
- [31] W. Jiao, G. Hagler, R. Williams, R. Sharpe, R. Brown, D. Garver, R. Judge, M. Caudill, J. Rickard, M. Davis, L. Weinstock, S. Zimmer-Dauphinee, and K. Buckley. Community air sensor network (cairsense) project: evaluation of low-cost sensor performance in a suburban environment in the southeastern united states. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(11):5281–5292, 2016. URL: <https://amt.copernicus.org/articles/9/5281/2016/>, doi:10.5194/amt-9-5281-2016.
- [32] C. Borrego, A. M. Costa, J. Ginja, M. Amorim, and K. Karatzas. 10 - EuNetAir air quality joint-exercise intercomparison: Assessment of microsensors versus reference methods. 2015. doi:10.5162/4EuNetAir2015/10.
- [33] Ludwig Fahrmeir, Christian Heumann, Rita Künstler, Iris Pigeot, and Gerhard Tutz. *Statistik*. Springer Berlin Heidelberg, 2016. doi:10.1007/978-3-662-50372-0.
- [34] T. Chai and R. R. Draxler. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3):1247–1250, jun 2014. doi:10.5194/gmd-7-1247-2014.
- [35] AQ-SPEC. aeroqual-aqy-(v0-5)—lab-evaluation. Technical report, 2018. URL: [http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/aeroqual-aqy-\(v0-5\)---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=24](http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/aeroqual-aqy-(v0-5)---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=24).
- [36] AQ-SPEC. aeroqual-aqy-v1-0—lab-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/aeroqual-aqy-v1-0---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.
- [37] AQ-SPEC. airbeam2—lab-evaluation. Technical report, 2018. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/airbeam2---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=17>.
- [38] AQ-SPEC. alphasense-opc-n3—lab-evaluation. Technical report, 2018. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/alphasense-opc-n3---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=14>.
- [39] AQ-SPEC. atmotube-pro—lab-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/atmotube-pro---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.

- [40] AQ-SPEC. dylos-dc1700-pm—lab-evaluation. Technical report, 2018. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/dylos-dc1700-pm---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=12>.
- [41] AQ-SPEC. elitech-temtop-lkc-1000s—lab-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/elitech-temtop-lkc-1000s---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.
- [42] AQ-SPEC. elitech-temtop-m2000-2nd-generation—lab-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/elitech-temtop-m2000-2nd-generation---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.
- [43] AQ-SPEC. kaiterra-laser-egg-2—laboratory-evaluation. Technical report, 2019. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/kaiterra-laser-egg-2---laboratory-evaluation.pdf?sfvrsn=14>.
- [44] AQ-SPEC. samyoung-s-c—model-xxdk3—field-evaluation. 2019. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/samyoung-s-c---sy-ds-dk3---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.
- [45] AQ-SPEC. sensirion-sps30—lab-evaluation. 2019. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/sensirion-sps30---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.
- [46] AQ-SPEC. smart-citizen-kit-v2-1—lab-evaluation. Technical report, 2019. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/smart-citizen-kit-v2-1---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.
- [47] AQ-SPEC. tsi-bluesky—lab-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/tsi-bluesky---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.
- [48] AQ-SPEC. air-quality-egg-2018-model—laboratory-evaluation. Technical report, 2018. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/air-quality-egg-2018-model---laboratory-evaluatione4afa3efc2b66fpdf?sfvrsn=30>.

- [49] AQ-SPEC. iqair-airvisual-pro-v1-1683-lab-evaluation. Technical report, 2018. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/iqair-airvisual-pro-v1-1683--lab-evaluation.pdf?sfvrsn=12>.
- [50] AQ-SPEC. kunak-air-a10-pm—lab-evaluation (1). 2019. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/kunak-air-a10-pm---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.
- [51] AQ-SPEC. sensirion-nubo—lab-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/laboratory-evaluations/sensirion-nubo---lab-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.
- [52] N. Zimmerman, A. A. Presto, S. P. N. Kumar, J. Gu, A. Haurlyuk, E. S. Robinson, A. L. Robinson, and R. Subramanian. A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(1):291–313, 2018. URL: <https://amt.copernicus.org/articles/11/291/2018/>, doi:10.5194/amt-11-291-2018.
- [53] A.C. Romain and J. Nicolas. Long term stability of metal oxide-based gas sensors for e-nose environmental applications: An overview. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 146(2):502–506, 2010. Selected Papers from the 13th International Symposium on Olfaction and Electronic Nose. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400509009630>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.12.027>.
- [54] Markus Lösch, Marc Baumbach, and Andreas Schütze. Ozone detection in the ppb-range with improved stability and reduced cross sensitivity. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 130(1):367–373, 2008. Proceedings of the Eleventh International Meeting on Chemical Sensors IMCS-11. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400507007022>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.09.033>.
- [55] Federico Karagulian, Maurizio Barbieri, Alexander Kotsev, Laurent Spinelle, Michel Gerboles, Friedrich Lagler, Nathalie Redon, Sabine Crunaire, and Annette Borowiak. Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, 10(9), 2019. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/10/9/506>, doi:10.3390/atmos10090506.
- [56] Katie R. Smith, Peter M. Edwards, Mathew J. Evans, James D. Lee, Marvin D. Shaw, Freya Squires, Shona Wilde, and Alastair C. Lewis. Clustering approaches to improve

- the performance of low cost air pollution sensors. *Faraday Discussions*, 200:621–637, 2017. doi:10.1039/C7FD00020K.
- [57] Alessandro Bigi, Michael Mueller, Stuart Grange, Grazia Ghermandi, and Christoph Hueglin. Performance of no, no₂ low cost sensors and three calibration approaches within a real world application. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11:3717–, 06 2018. doi:10.5194/amt-2018-26.
- [58] M.I. Mead, O.A.M. Popoola, G.B. Stewart, P. Landshoff, M. Calleja, M. Hayes, J.J. Baldovi, M.W. McLeod, T.F. Hodgson, J. Dicks, A. Lewis, J. Cohen, R. Baron, J.R. Saffell, and R.L. Jones. The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks. *Atmospheric Environment*, 70:186–203, may 2013. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.11.060.
- [59] Olalekan A.M. Popoola, David Carruthers, Chetan Lad, Vivien B. Bright, Mohammed I. Mead, Marc E.J. Stettler, John R. Saffell, and Roderic L. Jones. Use of networks of low cost air quality sensors to quantify air quality in urban settings. *Atmospheric Environment*, 194:58–70, dec 2018. doi:10.1016/j.atmosenv.2018.09.030.
- [60] B. Maag, O. Saukh, David Hasenfratz, and L. Thiele. Pre-deployment testing, augmentation and calibration of cross-sensitive sensors. 2016.
- [61] Laurent Spinelle, Michel Gerboles, Maria Gabriella Villani, Manuel Aleixandre, and Fausto Bonavitacola. Field calibration of a cluster of low-cost commercially available sensors for air quality monitoring. part b: No, co and co₂. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 238:706–715, 2017. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092540051631070X>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.036>.
- [62] Abdul Samad, Daniel Ricardo Obando Nuñez, Grecia Carolina Solis Castillo, Bernd Laquai, and Ulrich Vogt. Effect of relative humidity and air temperature on the results obtained from low-cost gas sensors for ambient air quality measurements. *Sensors*, 20(18), 2020. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/18/5175>, doi:10.3390/s20185175.
- [63] R. Jayaratne, X. Liu, P. Thai, M. Dunbabin, and L. Morawska. The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(8):4883–4890, 2018. URL: <https://amt.copernicus.org/articles/11/4883/2018/>, doi:10.5194/amt-11-4883-2018.

- [64] L. R. Crilley, M. Shaw, R. Pound, L. J. Kramer, R. Price, S. Young, A. C. Lewis, and F. D. Pope. Evaluation of a low-cost optical particle counter (alphasense opc-n2) for ambient air monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(2):709–720, 2018. URL: <https://amt.copernicus.org/articles/11/709/2018/>, doi: 10.5194/amt-11-709-2018.
- [65] Petra Bauerová, Adriana Šindelářová, Štěpán Rychlík, Zbyněk Novák, and Josef Keder. Low-cost air quality sensors: One-year field comparative measurement of different gas sensors and particle counters with reference monitors at tušimice observatory. *Atmosphere*, 11(5):492, may 2020. doi:10.3390/atmos11050492.
- [66] Said Munir, Martin Mayfield, Daniel Coca, Stephen A. Jubb, and Ogo Osammor. Analysing the performance of low-cost air quality sensors, their drivers, relative benefits and calibration in cities—a case study in sheffield. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(2), jan 2019. doi:10.1007/s10661-019-7231-8.
- [67] Abdul Samad, Freddy Ernesto Melchor Mimiaga, Bernd Laquai, and Ulrich Vogt. Investigating a low-cost dryer designed for low-cost pm sensors measuring ambient air quality. *Sensors*, 21(3), 2021. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/3/804>, doi:10.3390/s21030804.
- [68] S.V Krupa and A.H Legge. Passive sampling of ambient, gaseous air pollutants: an assessment from an ecological perspective. *Environmental Pollution*, 107(1):31–45, jan 2000. doi:10.1016/s0269-7491(99)00154-2.
- [69] Francesca Pannullo, Duncan Lee, Eugene Waclawski, and Alastair H. Leyland. How robust are the estimated effects of air pollution on health? accounting for model uncertainty using bayesian model averaging. *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*, 18:53–62, 2016. Environmental Exposure and Health. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877584515300289>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.sste.2016.04.001>.
- [70] S. Schmitz, S. Towers, G. Villena, A. Caseiro, R. Wegener, D. Klemp, I. Langer, F. Meier, and E. von Schneidmesser. Unraveling a black box: An open-source methodology for the field calibration of small air quality sensors. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2021:1–34, 2021. URL: <https://amt.copernicus.org/preprints/amt-2020-489/>, doi:10.5194/amt-2020-489.
- [71] Galo D. Astudillo, Luis E. Garza-Castanon, and Luis I. Minchala Avila. Design and evaluation of a reliable low-cost atmospheric pollution station in urban environment. *IEEE Access*, 8:51129–51144, 2020. doi:10.1109/ACCESS.2020.2980736.

- [72] Peng Wei, Zhi Ning, Sheng Ye, Li Sun, Fenhuan Yang, Ka Wong, Dane Westerdahl, and Peter Louie. Impact analysis of temperature and humidity conditions on electrochemical sensor response in ambient air quality monitoring. *Sensors*, 18(2):59, jan 2018. doi: 10.3390/s18020059.
- [73] Hongyong Li, Yujiao Zhu, Yong Zhao, Tianshu Chen, Ying Jiang, Ye Shan, Yuhong Liu, Jiangshan Mu, Xiangkun Yin, Di Wu, Cheng Zhang, Shuchun Si, Xinfeng Wang, Wenxing Wang, and Likun Xue. Evaluation of the performance of low-cost air quality sensors at a high mountain station with complex meteorological conditions. *Atmosphere*, 11(2):212, feb 2020. doi:10.3390/atmos11020212.
- [74] Federico Karagulian, A Borowiak, M Barbieri, Alexander Kotsev, J Broecke, Jan Vonk, J Signorini, and Michel Gerboles. Calibration of airsenseur boxes during a field study in the netherlands. Technical report, 06 2020.
- [75] Andrea Di Antonio, Olalekan Popoola, Bin Ouyang, John Saffell, and Roderic Jones. Developing a relative humidity correction for low-cost sensors measuring ambient particulate matter. *Sensors*, 18(9):2790, aug 2018. URL: <https://doi.org/10.3390/s18092790>, doi:<https://doi.org/10.3390/s18092790>.
- [76] Yixuan Jiang, Xinlei Zhu, Chen Chen, Yihui Ge, Weidong Wang, Zhuohui Zhao, Jing Cai, and Haidong Kan. On-field test and data calibration of a low-cost sensor for fine particles exposure assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211:111958, mar 2021. doi:10.1016/j.ecoenv.2021.111958.
- [77] Xiang Chen. Evaluating machine learning methods for calibrating low-cost pm2.5 sensor data. Master's thesis, Biostatistics, Bloomberg School of Public Health, Johns Hopkins University, May 2021. URL: <https://jscholarship.library.jhu.edu/handle/1774.2/64177?show=full>.
- [78] AQ-SPEC. aeroqual-aqy-v0-5—field-evaluation. Technical report, 2018. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/aeroqual-aqy-v0-5---field-evaluation.pdf?sfvrsn=22>.
- [79] AQ-SPEC. cairpol-cairsens-co—field-evaluation. Technical report, 2019. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/cairpol-cairsens-co---field-evaluatione340a0efc2b66f279.pdf?sfvrsn=6>.
- [80] AQ-SPEC. aeroqual-aqy-v1-0-(pm10)—field-evaluation. Technical report, 2020. URL: [http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/aeroqual-aqy-v1-0-\(pm10\)---field-evaluation.pdf?sfvrsn=14](http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/aeroqual-aqy-v1-0-(pm10)---field-evaluation.pdf?sfvrsn=14).

- [81] AQ-SPEC. aeroqual-aqy-v1-0—field-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/aeroqual-aqy-v1-0---field-evaluation.pdf?sfvrsn=21>.
- [82] AQ-SPEC. aeroqual-s500-pm—field-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/aeroqual-s500-pm---field-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.
- [83] AQ-SPEC. airbeam2—field-evaluation. Technical report, 2018. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/airbeam2---field-evaluation.pdf?sfvrsn=18>.
- [84] AQ-SPEC. airly—field-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/airly---field-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.
- [85] AQ-SPEC. alphasense-opc-n3—field-evaluation. Technical report, 2018. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/alphasense-opc-n3---field-evaluation.pdf?sfvrsn=12>.
- [86] AQ-SPEC. apis—field-evaluation. Technical report, 2019. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/apis---field-evaluation.pdf?sfvrsn=18>.
- [87] AQ-SPEC. apt-minima—field-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/apt-minima---field-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.
- [88] AQ-SPEC. aqmesh-v5-1 gas—field-evaluation. Technical report, 2020. URL: http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/aqmesh-v5-1_gas---field-evaluation.pdf?sfvrsn=20.
- [89] AQ-SPEC. atmotube-pro—field-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/atmotube-pro---field-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.
- [90] AQ-SPEC. cairpol-cairsens-no2—field-evaluation. Technical report, 2019. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/cairpol-cairsens-no2---field-evaluation.pdf?sfvrsn=12>.
- [91] AQ-SPEC. dylos-dc1700-pm—field-evaluation. Technical report, 2018. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/dylos-dc1700-pm---field-evaluation.pdf?sfvrsn=12>.

- [92] AQ-SPEC. ecowitt-wh41b—field-evaluation. Technical report, 2019. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/ecowitt-wh41b---field-evaluation.pdf?sfvrsn=6>.
- [93] AQ-SPEC. edimax-airbox—field-evaluation. Technical report, 2018. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/edimax-airbox---field-evaluation.pdf?sfvrsn=12>.
- [94] AQ-SPEC. edimax-edigreen-home—field-evaluation. Technical report, 2018. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/edimax-edigreen-home---field-evaluation.pdf?sfvrsn=12>.
- [95] AQ-SPEC. elitech-temptop-lkc-1000s—field-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/elitech-temptop-lkc-1000s---field-evaluation.pdf?sfvrsn=14>.
- [96] AQ-SPEC. elitech-temptop-m2000—field-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/elitech-temptop-m2000---field-evaluation.pdf?sfvrsn=15>.
- [97] AQ-SPEC. elitech-temptop-p20—field-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/elitech-temptop-p20---field-evaluation.pdf?sfvrsn=20>.
- [98] AQ-SPEC. kaiterra-laser-egg-2—field-evaluation. Technical report, 2019. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/kaiterra-laser-egg-2---field-evaluation.pdf?sfvrsn=6>.
- [99] AQ-SPEC. plume-labs-flow-2—field-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/plume-labs-flow-2---field-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.
- [100] AQ-SPEC. redspira—field-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/redspira---field-evaluation.pdf?sfvrsn=18>.
- [101] AQ-SPEC. samyoung-s-c—model-xxdk3—field-evaluation. Technical report, 2019. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/samyoung-s-c---model-xxdk3---field-evaluation.pdf?sfvrsn=18>.

- [102] AQ-SPEC. sensirion-sps30-evaluation-kit—field-evaluation. 2019. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/sensirion-sps30-evaluation-kit---field-evaluation.pdf?sfvrsn=42>.
- [103] AQ-SPEC. smart-citizen-kit-v2-1—field-evaluation. Technical report, 2019. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/smart-citizen-kit-v2-1---field-evaluation.pdf?sfvrsn=6>.
- [104] AQ-SPEC. tsi-bluesky—field-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/tsi-bluesky---field-evaluation.pdf?sfvrsn=20>.
- [105] AQ-SPEC. uradmonitor a3—field-evaluation. 2019. URL: http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/uradmonitor_a3---field-evaluatione840a0efc2b66f27bf6fff00004a91a9.pdf?sfvrsn=18.
- [106] AQ-SPEC. uradmonitor industrial—field-evaluation. Technical report, 2019. arXiv:29_uradmonitor_industrial---field-evaluatione40a0efc2b66f27bf6fff00004a91a9.
- [107] AQ-SPEC. uradmonitor-smoggie-pm-v1-101—field-evaluation. Technical report, 2020. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/uradmonitor-smoggie-pm-v1-101---field-evaluation.pdf?sfvrsn=8>.
- [108] AQ-SPEC. vaisala-aqt410-v-1-15—field-evaluation. Technical report, 2018. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/vaisala---field-evaluation.pdf?sfvrsn=14>.
- [109] AQ-SPEC. air-quality-egg—2018-model—field-evaluation. Technical report, 2018. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/air-quality-egg---2018-model---field-evaluation.pdf?sfvrsn=12>.
- [110] AQ-SPEC. clarity-node—field-evaluation. Technical report, 2018. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/clarity-node---field-evaluation.pdf?sfvrsn=6>.
- [111] AQ-SPEC. iqair-airvisual-pro-(fw1-1683)—field-evaluation. Technical report, 2018. URL: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/iqair-airvisual-pro---field-evaluation.pdf?sfvrsn=6>.

[112] AQ-SPEC. sensirion-nubo—field-evaluation. Technical report, 2020. URL:
[http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/
sensirion-nubo-air---field-evaluation.pdf?sfvrsn=23](http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/sensirion-nubo-air---field-evaluation.pdf?sfvrsn=23).

A. Gesamte Datenbank A

Hinweis: Datenbank A stellt die Gesamtübersicht aller Evaluierungsdatensätze dar. Bei Evaluierungen von AQ-SPEC führt die Referenz direkt zum technischen Bericht. Übersicht der Feldevaluierungen: <http://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations/field>; und Laborevaluierungen: <http://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations/laboratory>

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messtyp | OEMS/SSys | Mittelung | Labor/Field | Zeitraum | Kalibrier | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|----------|--------------|------------|---------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|-------|----------------|------|-----|------|----------|
| MQ-131 | Winsen | O3 | MOS | OEMS | 1h | F | 2M | MLR | 5.08 | N/A | 4.14 | N/A | 2020 | [71] |
| MQ-131 | Winsen | O3 | MOS | OEMS | 1h | F | 2M | ANN | 4.17 | N/A | 3.26 | N/A | 2020 | [71] |
| MQ-131 | Winsen | O3 | MOS | OEMS | 1h | F | 2M | RF | 5.05 | N/A | 3.89 | N/A | 2020 | [71] |
| SPEC-CO | SPEC | CO | MOS | OEMS | 1h | F | 2M | MLR | 0.17 | N/A | 0.16 | N/A | 2020 | [71] |
| SPEC-CO | SPEC | CO | MOS | OEMS | 1h | F | 2M | ANN | 0.21 | N/A | 0.23 | N/A | 2020 | [71] |
| SPEC-CO | SPEC | CO | MOS | OEMS | 1h | F | 2M | RF | 0.2 | N/A | 0.16 | N/A | 2020 | [71] |
| E-Mote | Wissenschaft | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 1J | SLRM | 0.002 | 0.25 | N/A | N/A | 2019 | [66] |
| E-Mote | Wissenschaft | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 1J | MLR | 0.012 | 0.51 | N/A | N/A | 2019 | [66] |
| E-Mote | Wissenschaft | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 1J | GAM | 2.8 | 0.17 | N/A | N/A | 2019 | [66] |
| E-Mote | Wissenschaft | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 1J | GAM | 9.89 | 0.7 | N/A | N/A | 2019 | [66] |
| C-5 | Memprador | O3 | EC | OEMS | 1h | F | 7M | MLR | N/A | 0.7396 | N/A | N/A | 2020 | [73] |
| C-5 | Memprador | CO | EC | OEMS | 1h | F | 7M | MLR | N/A | 0.7744 | N/A | N/A | 2020 | [73] |
| C-5 | Memprador | O3 | EC | OEMS | 1h | F | 7M | RF | N/A | 0.7744 | N/A | N/A | 2020 | [73] |
| CF-200 | Memprador | CO | EC | OEMS | 1h | F | 7M | MLR | N/A | 0.7569 | N/A | N/A | 2020 | [73] |
| CF-200 | Memprador | CO | EC | OEMS | 1h | F | 7M | RF | N/A | 0.7744 | N/A | N/A | 2020 | [73] |
| SDS019P | Nova Fitness | PM2.5 | LS | OEMS | 1h | F | 7M | RF | N/A | 0.7744 | N/A | N/A | 2020 | [73] |
| SDS019P | Nova Fitness | PM2.5 | LS | OEMS | 1h | F | 7M | MLR | N/A | 0.7744 | N/A | N/A | 2020 | [73] |
| B4 | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 5min | F | 11D | MLR | N/A | 0.84 | N/A | N/A | 2018 | [72] |
| B4 | Alphasense | CO | EC | OEMS | 5min | F | 11D | MLR | N/A | 0.96 | N/A | N/A | 2018 | [72] |
| B4 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 5min | F | 11D | MLR | N/A | 0.79 | N/A | N/A | 2018 | [72] |
| B4 | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 5min | F | 11D | MLR | N/A | 0.7 | N/A | N/A | 2018 | [72] |
| B4 | Alphasense | CO | EC | OEMS | 5min | F | 11D | MLR | N/A | 0.98 | N/A | N/A | 2018 | [72] |
| B4 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 5min | F | 11D | MLR | N/A | 0.73 | N/A | N/A | 2018 | [72] |
| B4 | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 5min | F | 11D | MLR | N/A | 0.87 | N/A | N/A | 2018 | [72] |
| B4 | Alphasense | CO | EC | OEMS | 5min | F | 11D | MLR | N/A | 0.97 | N/A | N/A | 2018 | [72] |
| B4 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 5min | F | 11D | MLR | N/A | 0.73 | N/A | N/A | 2018 | [72] |
| B4 | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 5min | F | 11D | MLR | N/A | 0.87 | N/A | N/A | 2018 | [72] |
| B4 | Alphasense | CO | EC | OEMS | 5min | F | 11D | MLR | N/A | 0.72 | N/A | N/A | 2018 | [72] |
| B4 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 5min | F | 11D | MLR | N/A | 0.98 | N/A | N/A | 2018 | [72] |
| B4 | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 5min | F | 11D | MLR | N/A | 0.808 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| CO-A4 | Alphasense | CO | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | 62.8 | 0.743 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| CO-A4 | Alphasense | CO | EC | OEMS | 1min | F | 3M | MLR | N/A | 0.864 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| CO-A4 | Alphasense | CO | EC | OEMS | 1h | F | 3M | MLR | N/A | 0.92 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| CO-A4 | Alphasense | CO | EC | OEMS | 1h | F | 3M | MLR | N/A | 0.855 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| NO2-B43F | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | 7.2 | 0.855 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| NO2-B43F | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 1min | F | 3M | MLR | 4.5 | 0.906 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| NO2-B43F | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 1h | F | 2M | MLR | N/A | 0.914 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| NO2-B43F | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 1h | F | 3M | MLR | N/A | 0.944 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| OX-A431 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | 9.5 | 0.845 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| OX-A431 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 1min | F | 3M | MLR | 5.9 | 0.932 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| OX-A431 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 1h | F | 2M | MLR | N/A | 0.882 | N/A | N/A | 2020 | [74] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMs/SSys | Mittelung | Labor/Field | Zeitraum | Kalibrier | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|-----------|-------------------------------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|----------|---------------------|-------|----------------|------|-------|------|----------|
| OX-A431 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 1h | F | 3M | MLR | N/A | 0,945 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| CO-A4 | Alphasense | CO | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | 21,2 | 0,872 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| CO-A4 | Alphasense | CO | EC | OEMS | 1h | F | 2M | MLR | N/A | 0,897 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| NO2-B43F | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | 8,5 | 0,813 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| NO2-B43F | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 1h | F | 2M | MLR | N/A | 0,904 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| OX-A431 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | 9 | 0,868 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| OX-A431 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 1h | F | 2M | MLR | N/A | 0,906 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| NO2-B43F | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | 6,9 | 0,857 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| NO2-B43F | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 1h | F | 2M | MLR | N/A | 0,939 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| OX-A431 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | 8,8 | 0,845 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| OX-A431 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 1h | F | 2M | MLR | N/A | 0,882 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| CO-A4 | Alphasense | CO | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | 23 | 0,85 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| CO-A4 | Alphasense | CO | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | 7,6 | 0,832 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| NO2-B43F | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | N/A | 0,916 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| NO2-B43F | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 1h | F | 2M | MLR | N/A | 0,882 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| OX-A431 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | 9 | 0,862 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| OX-A431 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | N/A | 0,902 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| CO-A4 | Alphasense | CO | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | 20,8 | 0,88 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| CO-A4 | Alphasense | CO | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | N/A | 0,913 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| NO2-B43F | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | 9,3 | 0,799 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| NO2-B43F | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 1h | F | 2M | MLR | N/A | 0,889 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| OX-A431 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 1min | F | 2M | MLR | 7,6 | 0,928 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| OX-A431 | Alphasense | O3 | EC | OEMS | 1h | F | 2M | MLR | N/A | 0,896 | N/A | N/A | 2020 | [74] |
| RAMP | Wissenschaft | CO | EC | SSys | 15min | F | 1,5M | RF | N/A | 0,91 | 38 | 0,1 | 2018 | [52] |
| RAMP | Wissenschaft | NO2 | EC | SSys | 15min | F | 1M | RF | N/A | 0,67 | 3,48 | -0,4 | 2018 | [52] |
| RAMP | Wissenschaft | O3 | EC | SSys | 15min | F | 1,5M | RF | N/A | 0,86 | 3,36 | -0,14 | 2018 | [52] |
| NO2-B43F | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 1h | F | 4M | MLR | 5,5 | 0,76 | 4,4 | N/A | 2018 | [? ?] |
| NO2-B43F | Alphasense | NO2 | EC | OEMS | 1h | F | 4M | MLR | 4,4 | 0,85 | 3,4 | N/A | 2018 | [? ?] |
| OPC-N2 | Alphasense | PM2,5 | LS | OEMS | 1h | F | 7d | RH-Anpassungsformel | 3,74 | 0,78 | N/A | N/A | 2018 | [75] |
| AS-LUNG-O | Wissenschaft | PM2,5 | LS | SSys | 1h | F | 1,5J | MLR | 6,91 | 0,76 | N/A | N/A | 2020 | [12] |
| AS-LUNG-O | Wissenschaft | PM2,5 | LS | SSys | 1h | F | 1,5J | SVR | 5,53 | 0,85 | N/A | N/A | 2020 | [12] |
| AS-LUNG-O | Wissenschaft | PM2,5 | LS | SSys | 1h | F | 1,5J | RF | 4,7 | 0,89 | N/A | N/A | 2020 | [12] |
| PMS 7003 | Plantower | PM2,5 | LS | OEMS | 1h | F | 7M | MLR | 8,43 | 0,83 | N/A | N/A | 2021 | [76] |
| PMS 7003 | Plantower | PM2,5 | LS | OEMS | 1h | F | 7M | RF | 7,87 | 0,85 | N/A | N/A | 2021 | [76] |
| PMS 7003 | Plantower | PM2,5 | LS | OEMS | 1h | F | 7M | MLR | 17,76 | 0,62 | N/A | N/A | 2021 | [76] |
| AQ-Mesh | Environmental Instruments Ltd | O3 | EC | SSys | 1h | F | 2M | RF | 17,62 | 0,63 | N/A | N/A | 2021 | [76] |
| AQ-Mesh | Environmental Instruments Ltd | O3 | EC | SSys | 1h | F | 2M | RF+LR | 5,8 | 0,91 | N/A | N/A | 2021 | [13] |
| AQ-Mesh | Environmental Instruments Ltd | O3 | EC | SSys | 1h | F | 2M | RF+LR | 4,5 | 0,97 | N/A | N/A | 2021 | [13] |
| AQ-Mesh | Environmental Instruments Ltd | O3 | EC | SSys | 1h | F | 3M | RF+LR | 10,6 | 0,95 | N/A | N/A | 2021 | [13] |
| AQ-Mesh | Environmental Instruments Ltd | O3 | EC | SSys | 1h | F | 3M | RF+LR | 9,9 | 0,95 | N/A | N/A | 2021 | [13] |
| AQ-Mesh | Environmental Instruments Ltd | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 2M | RF+LR | 14,1 | 0,9 | N/A | N/A | 2021 | [13] |
| AQ-Mesh | Environmental Instruments Ltd | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 2M | RF+LR | 5,6 | 0,93 | N/A | N/A | 2021 | [13] |
| AQ-Mesh | Environmental Instruments Ltd | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 3M | RF+LR | 9,1 | 0,38 | N/A | N/A | 2021 | [13] |
| AQ-Mesh | Environmental Instruments Ltd | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 3M | RF+LR | 11,1 | 0,5 | N/A | N/A | 2021 | [13] |
| PurpleAir | Purple Air | PM2,5 | LS | SSys | 1h | F | 1M | LR | N/A | 0,43 | 3,46 | N/A | 2021 | [77] |
| PurpleAir | Purple Air | PM2,5 | LS | SSys | 1h | F | 1M | RF | N/A | 0,44 | 3,52 | N/A | 2021 | [77] |
| Zephyr | EarthSense | NO2 | MOS | SSys | 1h | F | 2M | RF | 4,38 | 0,71 | N/A | N/A | 2021 | [70] |
| Zephyr | EarthSense | O3 | MOS | SSys | 1h | F | 2M | RF | 3,3 | 0,93 | N/A | N/A | 2021 | [70] |
| Zephyr | EarthSense | NO2 | MOS | SSys | 1h | F | 2M | MLR | 5,54 | 0,69 | N/A | N/A | 2021 | [70] |
| Zephyr | EarthSense | O3 | MOS | SSys | 1h | F | 2M | MLR | 3,33 | 0,93 | N/A | N/A | 2021 | [70] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMS/SSys | Mittelung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibrier | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|-------|------------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|--------|----------------|-----|-----|------|----------|
| AQ10x | ekoNET | CO | EC | SSys | 1h | F | IM | ANN | 0,038 | 0,968 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | CO | EC | SSys | 1h | F | IM | RF | 0,052 | 0,934 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | NO2 | EC | SSys | 1h | F | IM | ANN | 8,625 | 0,832 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | NO2 | EC | SSys | 1h | F | IM | RF | 5,976 | 0,904 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | PM10 | LS | SSys | 1h | F | IM | ANN | 12,549 | 0,737 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | PM10 | LS | SSys | 1h | F | IM | RF | 10,221 | 0,767 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | CO | EC | SSys | 1h | F | IM | ANN | 0,039 | 0,974 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | CO | EC | SSys | 1h | F | IM | RF | 0,042 | 0,97 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | NO2 | EC | SSys | 1h | F | IM | ANN | 10,001 | 0,866 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | NO2 | EC | SSys | 1h | F | IM | RF | 5,695 | 0,943 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | PM10 | LS | SSys | 1h | F | IM | ANN | 8,68 | 0,867 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | PM10 | LS | SSys | 1h | F | IM | RF | 7,204 | 0,891 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | CO | EC | SSys | 1h | F | IM | ANN | 0,047 | 0,885 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | NO2 | EC | SSys | 1h | F | IM | RF | 0,033 | 0,927 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | NO2 | EC | SSys | 1h | F | IM | ANN | 10,13 | 0,767 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | NO2 | EC | SSys | 1h | F | IM | RF | 9,46 | 0,817 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | PM10 | LS | SSys | 1h | F | IM | ANN | 8,664 | 0,678 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | PM10 | LS | SSys | 1h | F | IM | RF | 7,935 | 0,731 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | CO | EC | SSys | 1h | F | IM | ANN | 0,062 | 0,968 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | CO | EC | SSys | 1h | F | IM | RF | 0,067 | 0,949 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | NO2 | EC | SSys | 1h | F | IM | ANN | 11,82 | 0,875 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | NO2 | EC | SSys | 1h | F | IM | RF | 9,786 | 0,914 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | PM10 | LS | SSys | 1h | F | IM | ANN | 9,57 | 0,819 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQ10x | ekoNET | PM10 | LS | SSys | 1h | F | IM | RF | 8,94 | 0,824 | N/A | N/A | 2021 | [14] |
| AQY | Aeroqual | O3 | EC | SSys | 1h | F | 3M | N/A | N/A | 0,961 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | O3 | EC | SSys | 1h | F | 3M | N/A | N/A | 0,9761 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | O3 | EC | SSys | 1h | F | 3M | N/A | N/A | 0,9678 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | O3 | EC | SSys | 5min | F | 3M | N/A | N/A | 0,9514 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | O3 | EC | SSys | 5min | F | 3M | N/A | N/A | 0,9684 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | O3 | EC | SSys | 5min | F | 3M | N/A | N/A | 0,9492 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | O3 | EC | SSys | 5min | F | 3M | N/A | N/A | 0,9635 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | O3 | EC | SSys | 8h | F | 3M | N/A | N/A | 0,957 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | O3 | EC | SSys | 8h | F | 3M | N/A | N/A | 0,9653 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | O3 | EC | SSys | 8h | F | 3M | N/A | N/A | 0,9612 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 3M | N/A | N/A | 0,7787 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 3M | N/A | N/A | 0,8065 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 3M | N/A | N/A | 0,2058 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 3M | N/A | N/A | 0,8144 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 3M | N/A | N/A | 0,4802 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 3M | N/A | N/A | 0,56 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 3M | N/A | N/A | 0,4619 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 3M | N/A | N/A | 0,5185 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 24h | F | 3M | N/A | N/A | 0,813 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 24h | F | 3M | N/A | N/A | 0,8155 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 24h | F | 3M | N/A | N/A | 0,3971 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 24h | F | 3M | N/A | N/A | 0,8324 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 3M | N/A | N/A | 0,8745 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 3M | N/A | N/A | 0,8484 | N/A | N/A | 2018 | [78] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messtyp | OEMS/SSys | Mittelung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibrett | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|-------------------|------------|------------|---------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| AQY | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 3M | N/A | N/A | 0,8042 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 3M | N/A | N/A | 0,8562 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 3M | N/A | N/A | 0,8669 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 3M | N/A | N/A | 0,8412 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 3M | N/A | N/A | 0,7842 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 3M | N/A | N/A | 0,8481 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 3M | N/A | N/A | 0,9925 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 3M | N/A | N/A | 0,9126 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 3M | N/A | N/A | 0,8645 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 3M | N/A | N/A | 0,92323 | N/A | N/A | 2018 | [78] |
| AQY | Aeroqual | O3 | EC | SSys | 1min | L | 900min | N/A | N/A | 0,975 | N/A | N/A | 2018 | [35] |
| AQY | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 1min | L | 900min | N/A | N/A | 0,9802 | N/A | N/A | 2018 | [35] |
| AQY | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 5min | L | 900min | N/A | N/A | 0,9989 | N/A | N/A | 2018 | [35] |
| Cairsens | Envea | CO | EC | SSys | 5min | F | 3M | N/A | N/A | 0,9437 | N/A | N/A | 2019 | [79] |
| Cairsens | Envea | CO | EC | SSys | 5min | F | 3M | N/A | N/A | 0,9308 | N/A | N/A | 2019 | [79] |
| Cairsens | Envea | CO | EC | SSys | 5min | F | 3M | N/A | N/A | 0,9546 | N/A | N/A | 2019 | [79] |
| Cairsens | Envea | CO | EC | SSys | 1h | F | 3M | N/A | N/A | 0,9416 | N/A | N/A | 2019 | [79] |
| Cairsens | Envea | CO | EC | SSys | 1h | F | 3M | N/A | N/A | 0,9434 | N/A | N/A | 2019 | [79] |
| Cairsens | Envea | CO | EC | SSys | 24h | F | 3M | N/A | N/A | 0,9597 | N/A | N/A | 2019 | [79] |
| Cairsens | Envea | CO | EC | SSys | 24h | F | 3M | N/A | N/A | 0,9411 | N/A | N/A | 2019 | [79] |
| Cairsens | Envea | CO | EC | SSys | 24h | F | 3M | N/A | N/A | 0,9586 | N/A | N/A | 2019 | [79] |
| Cairsens | Envea | CO | EC | SSys | 24h | F | 3M | N/A | N/A | 0,6777 | N/A | N/A | 2020 | [80] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,5914 | N/A | N/A | 2020 | [80] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,561 | N/A | N/A | 2020 | [80] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7378 | N/A | N/A | 2020 | [80] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6397 | N/A | N/A | 2020 | [80] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,603 | N/A | N/A | 2020 | [80] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8297 | N/A | N/A | 2020 | [80] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7285 | N/A | N/A | 2020 | [80] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7405 | N/A | N/A | 2020 | [80] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | O3 | MOS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,9609 | N/A | N/A | 2020 | [81] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | O3 | MOS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,9735 | N/A | N/A | 2020 | [81] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | O3 | MOS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,9636 | N/A | N/A | 2020 | [81] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | O3 | MOS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9788 | N/A | N/A | 2020 | [81] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | O3 | MOS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9847 | N/A | N/A | 2020 | [81] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | O3 | MOS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9816 | N/A | N/A | 2020 | [81] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | O3 | MOS | SSys | 8h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9737 | N/A | N/A | 2020 | [81] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | O3 | MOS | SSys | 8h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9817 | N/A | N/A | 2020 | [81] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | O3 | MOS | SSys | 8h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9788 | N/A | N/A | 2020 | [81] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6003 | N/A | N/A | 2020 | [81] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7708 | N/A | N/A | 2020 | [81] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6863 | N/A | N/A | 2020 | [81] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8256 | N/A | N/A | 2020 | [81] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 8h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8093 | N/A | N/A | 2020 | [81] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | NO2 | EC | SSys | 8h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8305 | N/A | N/A | 2020 | [81] |
| Aeroqual AQY v1.0 | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 5min | L | 900min | N/A | N/A | 0,9987 | N/A | N/A | 2020 | [36] |
| S500 | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4697 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6112 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5608 | N/A | N/A | 2020 | [82] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMS/SSys | Mittelung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibrier | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|-----------|------------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| S500 | Aeroqual | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,4602 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,5957 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,5462 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6512 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,766 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7193 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,218 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2939 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2871 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1532 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2132 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1594 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4152 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,602 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| S500 | Aeroqual | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5675 | N/A | N/A | 2020 | [82] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7647 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8731 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8529 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0187 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0235 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0167 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6451 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6349 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6495 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0042 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0038 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0027 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7127 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7031 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7129 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0087 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,007 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0056 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9121 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9133 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0021 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0014 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0043 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,682 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6866 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6797 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0105 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0112 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0105 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8395 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8422 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8367 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0187 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0235 | N/A | N/A | 2018 | [83] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMS/SSys | Mittlung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibrett | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|-----------|------------|------------|----------|-----------|----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0167 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7437 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7481 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7387 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0427 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0455 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0414 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7825 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7909 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7801 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0654 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0675 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0624 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8764 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8843 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8723 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0812 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0917 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0785 | N/A | N/A | 2018 | [83] |
| AirBeam 2 | HabitatMap | PM25 | LS | SSys | 5min | L | 900min | N/A | N/A | 0,9938 | N/A | N/A | 2018 | [37] |
| Airy | Airy | O3 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,9371 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | O3 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,904 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | O3 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,9255 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | O3 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9471 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | O3 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9123 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | O3 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9343 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | O3 | EC | SSys | 8h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9529 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | O3 | EC | SSys | 8h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9075 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | O3 | EC | SSys | 8h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9351 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8048 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,5365 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6948 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8233 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5587 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7171 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | NO2 | EC | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8221 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | NO2 | EC | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3296 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | NO2 | EC | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7404 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8858 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8315 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8565 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8991 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8677 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8717 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9317 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9312 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9164 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8603 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7744 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airy | Airy | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7838 | N/A | N/A | 2020 | [84] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMS/SSys | Mittelung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibrier | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|--------|------------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| Airly | Airly | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8925 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8904 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8807 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,3688 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,3512 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,3444 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3959 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3882 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3695 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4615 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4726 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,43 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1879 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1958 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1789 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2997 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3106 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2716 | N/A | N/A | 2020 | [84] |
| Airly | Airly | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5918 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,5817 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6659 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6176 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6053 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6911 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6948 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6916 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7619 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4064 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4232 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4801 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7496 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7825 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8143 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,523 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,5373 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6116 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,535 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5511 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6243 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7928 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8103 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8464 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMS | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,496 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMS | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,4851 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMS | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,5172 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5038 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4827 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5333 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2497 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC-N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2254 | N/A | N/A | 2018 | [85] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMs/SSys | Mittelung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibrett | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|---------|------------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2558 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2769 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2756 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2882 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6821 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6716 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7045 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,4542 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,4504 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,4713 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4615 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4514 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4858 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7066 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7076 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7444 | N/A | N/A | 2018 | [85] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9913 | N/A | N/A | 2018 | [38] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM25 | LS | OEMs | 5min | L | 900min | N/A | N/A | 0,9913 | N/A | N/A | 2018 | [38] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 5min | L | 900min | N/A | N/A | 0,9954 | N/A | N/A | 2018 | [38] |
| OPC- N3 | Alphasense | PM10 | LS | OEMs | 5min | L | 900min | N/A | N/A | 0,9923 | N/A | N/A | 2018 | [38] |
| APIS | APIS | O3 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8307 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | O3 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7277 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | O3 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7636 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | O3 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8377 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | O3 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7352 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | O3 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7746 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | O3 | EC | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6958 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | O3 | EC | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3946 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | O3 | EC | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4169 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,4412 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,375 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2989 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,4781 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4023 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3412 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | NO2 | EC | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6682 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | NO2 | EC | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7145 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | CO | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,5321 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | CO | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8957 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | CO | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8738 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | CO | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8804 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | CO | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9153 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | CO | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9126 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | CO | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9123 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | CO | EC | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9215 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | CO | EC | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9147 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| APIS | APIS | CO | EC | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8919 | N/A | N/A | 2019 | [86] |
| MINIMA | AFT | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8616 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | AFT | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8844 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | AFT | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8871 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | AFT | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,887 | N/A | N/A | 2020 | [87] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMS/SSys | Mittelung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibrett | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|-------------|-------------------------------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| MINIMA | APT | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9032 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | APT | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9058 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | APT | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,937 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | APT | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9407 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | APT | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9404 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | APT | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,3688 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | APT | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,3704 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | APT | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,3717 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | APT | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4246 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | APT | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4228 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | APT | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4238 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | APT | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5341 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | APT | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5286 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | APT | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5297 | N/A | N/A | 2020 | [87] |
| MINIMA | APT | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7914 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | CO | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8145 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | CO | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7422 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | CO | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7494 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | CO | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8697 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | CO | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8145 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | CO | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8269 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | CO | EC | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9099 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | CO | EC | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,878 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | CO | EC | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8667 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | O3 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8897 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | O3 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8846 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | O3 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8988 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | O3 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,901 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | O3 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8901 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | O3 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9054 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | O3 | EC | SSys | 8h | F | 2M | N/A | N/A | 0,909 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | O3 | EC | SSys | 8h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8974 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | O3 | EC | SSys | 8h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9104 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2563 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2078 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | NO2 | EC | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,3511 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3301 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2731 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| AQMesh v5.1 | Environmental Instruments Ltd | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4503 | N/A | N/A | 2020 | [88] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8756 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8831 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8849 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8869 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8975 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8988 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,932 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,943 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9412 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7848 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7918 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7919 | N/A | N/A | 2020 | [89] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMS/SSys | Mittelung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibrett | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|------------------|------------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9144 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9182 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9173 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,22 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2198 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2236 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2514 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2519 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2558 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3909 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3898 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3873 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,184 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1905 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1933 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,311 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3165 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,314 | N/A | N/A | 2020 | [89] |
| Amotube PRO | ATMO TUBE | PM25 | LS | SSys | 5min | L | 900min | N/A | N/A | 0,9985 | N/A | N/A | 2020 | [39] |
| Cairpol Cairsens | Envea | NO2 | EC | OEMS | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,118 | N/A | N/A | 2019 | [90] |
| Cairpol Cairsens | Envea | NO2 | EC | OEMS | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0063 | N/A | N/A | 2019 | [90] |
| Cairpol Cairsens | Envea | NO2 | EC | OEMS | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0037 | N/A | N/A | 2019 | [90] |
| Cairpol Cairsens | Envea | NO2 | EC | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1293 | N/A | N/A | 2019 | [90] |
| Cairpol Cairsens | Envea | NO2 | EC | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0081 | N/A | N/A | 2019 | [90] |
| Cairpol Cairsens | Envea | NO2 | EC | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0046 | N/A | N/A | 2019 | [90] |
| Cairpol Cairsens | Envea | NO2 | EC | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4848 | N/A | N/A | 2019 | [90] |
| Cairpol Cairsens | Envea | NO2 | EC | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3958 | N/A | N/A | 2019 | [90] |
| Cairpol Cairsens | Envea | NO2 | EC | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3636 | N/A | N/A | 2019 | [90] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6762 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6663 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6727 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7202 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7105 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7178 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7784 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7832 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,78 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,5863 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6009 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,5918 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6292 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6464 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6233 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8025 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8098 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,788 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5175 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,546 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5174 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-FM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7589 | N/A | N/A | 2018 | [91] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMS/SSys | Mittlung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibrett | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|-----------------|------------|------------|----------|-----------|----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| DCI700-PM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,783 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7465 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,166 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1607 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1502 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1689 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1726 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1564 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0013 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,001 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0003 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1783 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1763 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1618 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2057 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2075 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1724 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3832 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3862 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2975 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0644 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0659 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0588 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3028 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3094 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2341 | N/A | N/A | 2018 | [91] |
| DCI700-PM | Dylos | PM25 | LS | SSys | 5min | L | 900min | N/A | N/A | 0,9543 | N/A | N/A | 2018 | [40] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,3451 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,3473 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,474 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4696 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4727 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5692 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6891 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6886 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7363 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2595 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,26 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3364 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,4203 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,4225 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,5764 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,5041 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,505 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| WH41B | Ecowitt | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5963 | N/A | N/A | 2019 | [92] |
| Model AL-1001 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8653 | N/A | N/A | 2018 | [93] |
| Model AL-1001 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8546 | N/A | N/A | 2018 | [93] |
| Model AL-1001 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,852 | N/A | N/A | 2018 | [93] |
| Model AL-1001 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8664 | N/A | N/A | 2018 | [93] |
| Model AL-1001 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8412 | N/A | N/A | 2018 | [93] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMS/SSys | Mittelung | Labor/Field | Zeitraum | Kalibrett | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|-----------------|------------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| Model AI-1001 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8334 | N/A | N/A | 2018 | [93] |
| Model AI-1001 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6783 | N/A | N/A | 2018 | [93] |
| Model AI-1001 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6366 | N/A | N/A | 2018 | [93] |
| Model AI-1001 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6148 | N/A | N/A | 2018 | [93] |
| Model AI-1001 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6503 | N/A | N/A | 2018 | [93] |
| Model AI-1001 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6096 | N/A | N/A | 2018 | [93] |
| Model AI-1001 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5862 | N/A | N/A | 2018 | [93] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8242 | N/A | N/A | 2018 | [94] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8272 | N/A | N/A | 2018 | [94] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8205 | N/A | N/A | 2018 | [94] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8426 | N/A | N/A | 2018 | [94] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,846 | N/A | N/A | 2018 | [94] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8399 | N/A | N/A | 2018 | [94] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8358 | N/A | N/A | 2018 | [94] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8686 | N/A | N/A | 2018 | [94] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8462 | N/A | N/A | 2018 | [94] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7137 | N/A | N/A | 2018 | [94] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7436 | N/A | N/A | 2018 | [94] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7208 | N/A | N/A | 2018 | [94] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,627 | N/A | N/A | 2018 | [94] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6761 | N/A | N/A | 2018 | [94] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6343 | N/A | N/A | 2018 | [94] |
| Model AI-2002 W | Edimax | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9214 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,9094 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,9145 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9298 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9253 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9579 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9511 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9568 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3473 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,3125 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,3264 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,3744 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,35 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3653 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5088 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,488 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5039 | N/A | N/A | 2020 | [95] |
| LKC-1000S+ | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9988 | N/A | N/A | 2020 | [41] |
| M2000 2.Gen. | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 5min | L | 900min | N/A | N/A | 0,9988 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2.Gen. | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7691 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2.Gen. | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7866 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2.Gen. | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7943 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2.Gen. | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8375 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2.Gen. | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8272 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2.Gen. | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8238 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2.Gen. | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8938 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2.Gen. | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8621 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2.Gen. | TempTOP | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8718 | N/A | N/A | 2020 | [96] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMS/SSys | Mittlung | Labor/Field | Zeitraum | Kalibrett | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|---------------|------------|------------|----------|-----------|----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7917 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7868 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8218 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8489 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8083 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8386 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,858 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8119 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8661 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2121 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1765 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2061 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2955 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2405 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2736 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,499 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4647 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2712 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2221 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2756 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3314 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2669 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3261 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4383 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5295 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5328 | N/A | N/A | 2020 | [96] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 5min | L | 900min | N/A | N/A | 0,999 | N/A | N/A | 2020 | [42] |
| M2000 2. Gen. | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,5665 | N/A | N/A | 2020 | [97] |
| P20 | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,4196 | N/A | N/A | 2020 | [97] |
| P20 | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8743 | N/A | N/A | 2020 | [97] |
| P20 | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6861 | N/A | N/A | 2020 | [97] |
| P20 | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7109 | N/A | N/A | 2020 | [97] |
| P20 | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9085 | N/A | N/A | 2020 | [97] |
| P20 | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8803 | N/A | N/A | 2020 | [97] |
| P20 | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8633 | N/A | N/A | 2020 | [97] |
| P20 | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9174 | N/A | N/A | 2020 | [97] |
| P20 | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7835 | N/A | N/A | 2020 | [97] |
| P20 | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8113 | N/A | N/A | 2020 | [97] |
| P20 | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8938 | N/A | N/A | 2020 | [97] |
| P20 | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9368 | N/A | N/A | 2020 | [97] |
| P20 | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9364 | N/A | N/A | 2020 | [97] |
| P20 | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9613 | N/A | N/A | 2020 | [97] |
| P20 | TempTOP | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8479 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8517 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8577 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8682 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8687 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8757 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9145 | N/A | N/A | 2019 | [98] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMS/SSys | Mittlung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibrett | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|--------------|------------|------------|----------|-----------|----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9207 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9248 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5928 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6002 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6254 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6884 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7037 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7246 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8308 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8329 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7651 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8428 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8422 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8576 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8612 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8621 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8808 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1554 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1659 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1857 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8711 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9001 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,903 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2181 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2931 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2597 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1247 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1425 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1781 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1078 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1722 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1843 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2302 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2416 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2708 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2571 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,27 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3087 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2507 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3253 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3179 | N/A | N/A | 2019 | [98] |
| Laser Egg 2+ | Kaiterra | PM25 | LS | SSys | 5min | L | 900min | N/A | N/A | 0,9989 | N/A | N/A | 2019 | [43] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1114 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1275 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0097 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1728 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2103 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0284 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3269 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5041 | N/A | N/A | 2020 | [99] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMS/SSys | Mittelung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibrett | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|----------|------------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0.121 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.1301 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.1497 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.027 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0.3984 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0.3273 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0.0016 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0.0339 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0.0165 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0.0013 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.0893 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.0463 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.0033 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0.3265 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0.2319 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0.0621 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.0239 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.0079 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.3984 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0.3273 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0.00016 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0.0817 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0.0886 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0.0106 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0.0288 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0.0115 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Flow 2 | Plume Labs | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0.0026 | N/A | N/A | 2020 | [99] |
| Redspira | Certuit | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0.7273 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0.8737 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0.818 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.8107 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.8882 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.8464 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0.9287 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0.9265 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0.9146 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.8102 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.7686 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.913 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0.8979 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0.8862 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0.3094 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0.3686 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0.3361 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.3691 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.4042 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0.3775 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0.515 | N/A | N/A | 2020 | [100] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMs/SSys | Mittelung | Labor/Field | Zeitraum | Kalibrier | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|-----------|-------------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| Redspira | Certuit | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5006 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4816 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,201 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2264 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2065 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,369 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3695 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| Redspira | Certuit | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3538 | N/A | N/A | 2020 | [100] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6012 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,624 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6216 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6377 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6557 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6707 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6962 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6902 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5456 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5448 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5501 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6531 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6451 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6559 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6674 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6948 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6946 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7048 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7251 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7255 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7693 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7849 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7887 | N/A | N/A | 2019 | [101] |
| SY-DS-DK3 | SamYoung SC | PM25 | LS | OEMs | 5min | L | 900min | N/A | N/A | 0,9884 | N/A | N/A | 2019 | [44] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7953 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7983 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8001 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8342 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8289 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8301 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8574 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8543 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8542 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6441 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6433 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6475 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6797 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6819 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6876 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1956 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM25 | LS | OEMs | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1951 | N/A | N/A | 2019 | [102] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMs/SSys | Mittelung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibrier | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|----------|---------------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2004 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8345 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8362 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8408 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8347 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8367 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8441 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0721 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0703 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0721 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1235 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1154 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1186 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1154 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1044 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1065 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1134 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1072 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1121 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1928 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1798 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1889 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2493 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,241 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2479 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2964 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2823 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2924 | N/A | N/A | 2019 | [102] |
| SPS30 | Sensirion | PM2.5 | LS | OEMS | 5min | L | 900min | N/A | N/A | 0,995 | N/A | N/A | 2019 | [45] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7719 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,759 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7695 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7984 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7854 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7959 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9218 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9207 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9257 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7127 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7105 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,719 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9018 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9013 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,905 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7692 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7644 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7735 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7899 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7853 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM2.5 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7949 | N/A | N/A | 2019 | [103] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMS/SSys | Mittlung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibrett | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|----------|---------------|------------|----------|-----------|----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,917 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9126 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,9162 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0592 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0569 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0602 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,07 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,067 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0705 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,167 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1693 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1705 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0377 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0379 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0401 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1021 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1008 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1017 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0855 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0853 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0881 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,096 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0956 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0991 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2257 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2182 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2191 | N/A | N/A | 2019 | [103] |
| Kit v2.1 | Smart Citizen | PM25 | LS | SSys | 5min | L | 900hmin | N/A | N/A | 0,9987 | N/A | N/A | 2019 | [46] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7249 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7195 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7259 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7556 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7473 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7551 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7735 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7887 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8102 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6514 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,6966 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7592 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6659 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7079 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,773 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5703 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6867 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,787 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1454 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0946 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,0905 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2098 | N/A | N/A | 2020 | [104] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMS/SSys | Mittelung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibrett | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|----------|--------------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1435 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1403 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,315 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2849 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2885 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,2088 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1492 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,1605 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2126 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1543 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1607 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2767 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2854 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3458 | N/A | N/A | 2020 | [104] |
| BlueSky | TSI | PM25 | LS | SSys | 5min | L | 900min | N/A | N/A | 0,999 | N/A | N/A | 2020 | [47] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7501 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7455 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7808 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8195 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7915 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8294 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7007 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7245 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7401 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7922 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8126 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8252 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,782 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8118 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8351 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8229 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8446 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8594 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1473 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1616 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1468 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,26 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,229 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2253 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1842 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2366 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1894 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3499 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3447 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3157 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3495 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4139 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3652 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5207 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,5273 | N/A | N/A | 2019 | [105] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMS/SSys | Mittelung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibret | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|------------------|--------------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|----------|----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| MODEL A3 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4976 | N/A | N/A | 2019 | [105] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | O3 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,001 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | O3 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0042 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | O3 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0807 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,003 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0503 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | NO2 | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0302 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | CO | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0012 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | CO | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0158 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | CO | EC | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,0697 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7027 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6735 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7449 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1336 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1234 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1215 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8033 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7805 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7562 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2417 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2203 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1458 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6621 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6649 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7605 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1763 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1712 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,1785 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8319 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,769 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7903 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3321 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3144 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,2402 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7491 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,746 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8457 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3379 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3376 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,3505 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8021 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8152 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8574 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,499 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,4909 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Industrial HW103 | URad Monitor | PM10 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,417 | N/A | N/A | 2019 | [106] |
| Smogge-PM v.101 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8099 | N/A | N/A | 2020 | [107] |
| Smogge-PM v.101 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,7935 | N/A | N/A | 2020 | [107] |
| Smogge-PM v.101 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,8046 | N/A | N/A | 2020 | [107] |
| Smogge-PM v.101 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8568 | N/A | N/A | 2020 | [107] |

| Model | Hersteller | Schadstoff | Messstyp | OEMS/SSys | Mittelung | Labor/ Feld | Zeitraum | Kalibrier | RMSE | R ² | MAE | MBE | Jahr | Referenz |
|------------------|--------------|------------|----------|-----------|-----------|-------------|----------|-----------|------|----------------|-----|-----|------|----------|
| Smoggie-PM v.101 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8377 | N/A | N/A | 2020 | [107] |
| Smoggie-PM v.101 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8485 | N/A | N/A | 2020 | [107] |
| Smoggie-PM v.101 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8768 | N/A | N/A | 2020 | [107] |
| Smoggie-PM v.101 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,8612 | N/A | N/A | 2020 | [107] |
| Smoggie-PM v.101 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 24h | F | 2M | N/A | N/A | 0,862 | N/A | N/A | 2020 | [107] |
| Smoggie-PM v.101 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,686 | N/A | N/A | 2020 | [107] |
| Smoggie-PM v.101 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,615 | N/A | N/A | 2020 | [107] |
| Smoggie-PM v.101 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 5min | F | 2M | N/A | N/A | 0,5988 | N/A | N/A | 2020 | [107] |
| Smoggie-PM v.101 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,7091 | N/A | N/A | 2020 | [107] |
| Smoggie-PM v.101 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6346 | N/A | N/A | 2020 | [107] |
| Smoggie-PM v.101 | URad Monitor | PM25 | LS | SSys | 1h | F | 2M | N/A | N/A | 0,6188 | N/A | N/A | 2020 | [107] |

B. Datensätze der Boxplots

B.1. Tabelle zu Abbildung 17

| Messtyp | OEMS/ SSys | Mittelung | Zeitraum | R ² | Jahr | Referenz |
|---------|------------|-----------|----------|----------------|------|----------|
| EC | SSys | 1h | 3M | 0,961 | 2018 | [78] |
| EC | SSys | 1h | 3M | 0,9761 | 2018 | [78] |
| EC | SSys | 1h | 3M | 0,9612 | 2018 | [78] |
| EC | SSys | 1h | 3M | 0,9678 | 2018 | [78] |
| EC | SSys | 1h | 3M | 0,7787 | 2018 | [78] |
| EC | SSys | 1h | 3M | 0,8065 | 2018 | [78] |
| EC | SSys | 1h | 3M | 0,2058 | 2018 | [78] |
| EC | SSys | 1h | 3M | 0,8144 | 2018 | [78] |
| EC | SSys | 1h | 3M | 0,9546 | 2019 | [79] |
| EC | SSys | 1h | 3M | 0,9416 | 2019 | [79] |
| EC | SSys | 1h | 3M | 0,9434 | 2019 | [79] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,6863 | 2020 | [81] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,8256 | 2020 | [81] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,9471 | 2020 | [84] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,9123 | 2020 | [84] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,9343 | 2020 | [84] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,8233 | 2020 | [84] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,5587 | 2020 | [84] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,7171 | 2020 | [84] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,8377 | 2019 | [86] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,7352 | 2019 | [86] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,7746 | 2019 | [86] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,4781 | 2019 | [86] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,4023 | 2019 | [86] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,3412 | 2019 | [86] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,9153 | 2019 | [86] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,9126 | 2019 | [86] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,9123 | 2019 | [86] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,8697 | 2020 | [88] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,8145 | 2020 | [88] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,8269 | 2020 | [88] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,901 | 2020 | [88] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,8901 | 2020 | [88] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,9054 | 2020 | [88] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,3301 | 2020 | [88] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,2731 | 2020 | [88] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,4503 | 2020 | [88] |
| EC | OEMS | 1h | 2M | 0,1293 | 2019 | [90] |
| EC | OEMS | 1h | 2M | 0,0081 | 2019 | [90] |
| EC | OEMS | 1h | 2M | 0,0046 | 2019 | [90] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,001 | 2019 | [106] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,0042 | 2019 | [106] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,0807 | 2019 | [106] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,003 | 2019 | [106] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,0503 | 2019 | [106] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,0302 | 2019 | [106] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,0012 | 2019 | [106] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,0158 | 2019 | [106] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,0697 | 2019 | [106] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,5643 | 2018 | [108] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,4497 | 2018 | [108] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,6225 | 2018 | [108] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,85 | 2018 | [108] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,8721 | 2018 | [108] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,8746 | 2018 | [108] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,6679 | 2018 | [108] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,7145 | 2018 | [108] |
| EC | SSys | 1h | 2M | 0,8148 | 2018 | [108] |
| LS | SSys | 1h | 3M | 0,8745 | 2018 | [78] |
| LS | SSys | 1h | 3M | 0,8484 | 2018 | [78] |
| LS | SSys | 1h | 3M | 0,8042 | 2018 | [78] |
| LS | SSys | 1h | 3M | 0,8562 | 2018 | [78] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7378 | 2020 | [80] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6397 | 2020 | [80] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,603 | 2020 | [80] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,4697 | 2020 | [82] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6112 | 2020 | [82] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,5608 | 2020 | [82] |

| | | | | | | |
|----|------|----|----|--------|------|------|
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,218 | 2020 | [82] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2939 | 2020 | [82] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2871 | 2020 | [82] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7647 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8731 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8529 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7127 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7031 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7129 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0087 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,007 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0056 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,682 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6866 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6797 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0105 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0112 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0105 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7825 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7909 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7801 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0654 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0675 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0624 | 2018 | [83] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8991 | 2020 | [84] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8677 | 2020 | [84] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8717 | 2020 | [84] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8603 | 2020 | [84] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7744 | 2020 | [84] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7838 | 2020 | [84] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3959 | 2020 | [84] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3882 | 2020 | [84] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3695 | 2020 | [84] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1958 | 2020 | [84] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1879 | 2020 | [84] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1789 | 2020 | [84] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,6176 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,6053 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,6911 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,4064 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,4232 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,4801 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,535 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,5511 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,6243 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,5038 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,4827 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,5333 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,2769 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,2756 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,2882 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,4615 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,4514 | 2018 | [85] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,4858 | 2018 | [85] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,887 | 2020 | [87] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,9032 | 2020 | [87] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,9058 | 2020 | [87] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,4246 | 2020 | [87] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,4228 | 2020 | [87] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,4238 | 2020 | [87] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8869 | 2020 | [89] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8975 | 2020 | [89] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8988 | 2020 | [89] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7848 | 2020 | [89] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7918 | 2020 | [89] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7919 | 2020 | [89] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2514 | 2020 | [89] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2519 | 2020 | [89] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2558 | 2020 | [89] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,184 | 2020 | [89] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1905 | 2020 | [89] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1933 | 2020 | [89] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7202 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7105 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7178 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6292 | 2018 | [91] |

| | | | | | | |
|----|------|----|----|--------|------|------|
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6464 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6233 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,5175 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,546 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,5174 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1689 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1726 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1564 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2057 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2075 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1724 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0644 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0659 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0588 | 2018 | [91] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,4696 | 2019 | [92] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,4727 | 2019 | [92] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,5692 | 2019 | [92] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2595 | 2019 | [92] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,26 | 2019 | [92] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3364 | 2019 | [92] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8653 | 2018 | [93] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8546 | 2018 | [93] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,852 | 2018 | [93] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6783 | 2018 | [93] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6366 | 2018 | [93] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6148 | 2018 | [93] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8426 | 2018 | [94] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,846 | 2018 | [94] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8399 | 2018 | [94] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7137 | 2018 | [94] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7436 | 2018 | [94] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7208 | 2018 | [94] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,9298 | 2020 | [95] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,9203 | 2020 | [95] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,9253 | 2020 | [95] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3744 | 2020 | [95] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,35 | 2020 | [95] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3653 | 2020 | [95] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8375 | 2020 | [96] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8272 | 2020 | [96] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8238 | 2020 | [96] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8489 | 2020 | [96] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8083 | 2020 | [96] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8386 | 2020 | [96] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2955 | 2020 | [96] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2405 | 2020 | [96] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2736 | 2020 | [96] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3314 | 2020 | [96] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2669 | 2020 | [96] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3261 | 2020 | [96] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6861 | 2020 | [97] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7109 | 2020 | [97] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,9085 | 2020 | [97] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7835 | 2020 | [97] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8113 | 2020 | [97] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8938 | 2020 | [97] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8682 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8687 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8757 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,5928 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6002 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6254 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8428 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8422 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8576 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8711 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,9001 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,903 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1247 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1425 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1781 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2571 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,27 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3087 | 2019 | [98] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1728 | 2020 | [99] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2103 | 2020 | [99] |

| | | | | | | |
|----|------|----|----|--------|------|-------|
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0284 | 2020 | [99] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1301 | 2020 | [99] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1497 | 2020 | [99] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,027 | 2020 | [99] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0893 | 2020 | [99] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0463 | 2020 | [99] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0033 | 2020 | [99] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0621 | 2020 | [99] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0239 | 2020 | [99] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0079 | 2020 | [99] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8107 | 2020 | [100] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8882 | 2020 | [100] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8464 | 2020 | [100] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7393 | 2020 | [100] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8102 | 2020 | [100] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7686 | 2020 | [100] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3691 | 2020 | [100] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,4042 | 2020 | [100] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3775 | 2020 | [100] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,201 | 2020 | [100] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2264 | 2020 | [100] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2065 | 2020 | [100] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,6377 | 2019 | [101] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,657 | 2019 | [101] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,6557 | 2019 | [101] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,5456 | 2019 | [101] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,5448 | 2019 | [101] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,5501 | 2019 | [101] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,7048 | 2019 | [101] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,7251 | 2019 | [101] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,7255 | 2019 | [101] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,8342 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,8289 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,8301 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,6441 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,6433 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,6475 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,8345 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,8362 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,8408 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,1235 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,1154 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,1186 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,1134 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,1072 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,1121 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,2493 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,241 | 2019 | [102] |
| LS | OEMS | 1h | 2M | 0,2479 | 2019 | [102] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7984 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7854 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7959 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7127 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7105 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,719 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7899 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7853 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7949 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,07 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,067 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0705 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0377 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0379 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0401 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,096 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0956 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0991 | 2019 | [103] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7556 | 2020 | [104] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7473 | 2020 | [104] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7551 | 2020 | [104] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6659 | 2020 | [104] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7079 | 2020 | [104] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,773 | 2020 | [104] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2098 | 2020 | [104] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1435 | 2020 | [104] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1403 | 2020 | [104] |

| | | | | | | |
|----|------|----|----|--------|------|-------|
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2126 | 2020 | [104] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1543 | 2020 | [104] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1607 | 2020 | [104] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7501 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7455 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7808 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7007 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7245 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7401 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,782 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8118 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8351 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1473 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1616 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1468 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1842 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,2366 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1894 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3495 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,4139 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3652 | 2019 | [105] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7027 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6735 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7449 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1336 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1234 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1215 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6621 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6649 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7605 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1763 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1712 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1785 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7491 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,746 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8457 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3379 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3376 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,3505 | 2019 | [106] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8568 | 2020 | [107] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8377 | 2020 | [107] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8485 | 2020 | [107] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7091 | 2020 | [107] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6346 | 2020 | [107] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6188 | 2020 | [107] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1013 | 2020 | [107] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0434 | 2020 | [107] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0907 | 2020 | [107] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0706 | 2020 | [107] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0384 | 2020 | [107] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,0324 | 2020 | [107] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8563 | 2018 | [109] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8703 | 2018 | [109] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8544 | 2018 | [109] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,5929 | 2018 | [109] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6356 | 2018 | [109] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,5769 | 2018 | [109] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1134 | 2018 | [109] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1156 | 2018 | [109] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,1121 | 2018 | [109] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7327 | 2018 | [110] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7579 | 2018 | [110] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7384 | 2018 | [110] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6561 | 2018 | [111] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8152 | 2018 | [111] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8656 | 2018 | [111] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6605 | 2018 | [111] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7403 | 2018 | [111] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6918 | 2018 | [111] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7576 | 2018 | [111] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7277 | 2018 | [111] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,6929 | 2018 | [111] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8236 | 2018 | [111] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,8097 | 2018 | [111] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7747 | 2018 | [111] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7825 | 2020 | [112] |

| | | | | | | |
|-----|------|----|----|--------|------|-------|
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7901 | 2020 | [112] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,7663 | 2020 | [112] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,9199 | 2020 | [112] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,9146 | 2020 | [112] |
| LS | SSys | 1h | 2M | 0,9111 | 2020 | [112] |
| MOS | SSys | 1h | 2M | 0,9788 | 2020 | [81] |
| MOS | SSys | 1h | 2M | 0,9847 | 2020 | [81] |
| MOS | SSys | 1h | 2M | 0,9816 | 2020 | [81] |

B.2. Tabelle zu Abbildung 18

| Schadstoff | OEMS/ SSys | Mittelung | Zeitraum | R ² | Jahr | Referenz |
|------------|------------|-----------|----------|----------------|------|----------|
| CO | SSys | 1h | 3M | 0,9546 | 2019 | [79] |
| CO | SSys | 1h | 3M | 0,9416 | 2019 | [79] |
| CO | SSys | 1h | 3M | 0,9434 | 2019 | [79] |
| CO | SSys | 1h | 2M | 0,9153 | 2019 | [86] |
| CO | SSys | 1h | 2M | 0,9126 | 2019 | [86] |
| CO | SSys | 1h | 2M | 0,9123 | 2019 | [86] |
| CO | SSys | 1h | 2M | 0,8697 | 2020 | [88] |
| CO | SSys | 1h | 2M | 0,8145 | 2020 | [88] |
| CO | SSys | 1h | 2M | 0,8269 | 2020 | [88] |
| CO | SSys | 1h | 2M | 0,0012 | 2019 | [106] |
| CO | SSys | 1h | 2M | 0,0158 | 2019 | [106] |
| CO | SSys | 1h | 2M | 0,0697 | 2019 | [106] |
| CO | SSys | 1h | 2M | 0,85 | 2018 | [108] |
| CO | SSys | 1h | 2M | 0,8721 | 2018 | [108] |
| CO | SSys | 1h | 2M | 0,8746 | 2018 | [108] |
| NO2 | SSys | 1h | 3M | 0,7787 | 2018 | [78] |
| NO2 | SSys | 1h | 3M | 0,8065 | 2018 | [78] |
| NO2 | SSys | 1h | 3M | 0,2058 | 2018 | [78] |
| NO2 | SSys | 1h | 3M | 0,8144 | 2018 | [78] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,6863 | 2020 | [81] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,8256 | 2020 | [81] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,8233 | 2020 | [84] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,5587 | 2020 | [84] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,7171 | 2020 | [84] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,4781 | 2019 | [86] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,4023 | 2019 | [86] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,3412 | 2019 | [86] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,3301 | 2020 | [88] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,2731 | 2020 | [88] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,4503 | 2020 | [88] |
| NO2 | OEMS | 1h | 2M | 0,1293 | 2019 | [90] |
| NO2 | OEMS | 1h | 2M | 0,0081 | 2019 | [90] |
| NO2 | OEMS | 1h | 2M | 0,0046 | 2019 | [90] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,003 | 2019 | [106] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,0503 | 2019 | [106] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,0302 | 2019 | [106] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,5643 | 2018 | [108] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,4497 | 2018 | [108] |
| NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,6225 | 2018 | [108] |
| O3 | SSys | 1h | 3M | 0,961 | 2018 | [78] |
| O3 | SSys | 1h | 3M | 0,9761 | 2018 | [78] |
| O3 | SSys | 1h | 3M | 0,9612 | 2018 | [78] |
| O3 | SSys | 1h | 3M | 0,9678 | 2018 | [78] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,9788 | 2020 | [81] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,9847 | 2020 | [81] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,9816 | 2020 | [81] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,9471 | 2020 | [84] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,9123 | 2020 | [84] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,9343 | 2020 | [84] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,8377 | 2019 | [86] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,7352 | 2019 | [86] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,7746 | 2019 | [86] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,901 | 2020 | [88] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,8901 | 2020 | [88] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,9054 | 2020 | [88] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,001 | 2019 | [106] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,0042 | 2019 | [106] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,0807 | 2019 | [106] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,6679 | 2018 | [108] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,7145 | 2018 | [108] |
| O3 | SSys | 1h | 2M | 0,8148 | 2018 | [108] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,7378 | 2020 | [80] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,6397 | 2020 | [80] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,603 | 2020 | [80] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,218 | 2020 | [82] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2939 | 2020 | [82] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2871 | 2020 | [82] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,7647 | 2018 | [83] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,8731 | 2018 | [83] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,8529 | 2018 | [83] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0087 | 2018 | [83] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,007 | 2018 | [83] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0056 | 2018 | [83] |

| | | | | | | |
|------|------|----|----|--------|------|-------|
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0105 | 2018 | [83] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0112 | 2018 | [83] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0105 | 2018 | [83] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0654 | 2018 | [83] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0675 | 2018 | [83] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0624 | 2018 | [83] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,3959 | 2020 | [84] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,3882 | 2020 | [84] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,3695 | 2020 | [84] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1958 | 2020 | [84] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1879 | 2020 | [84] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1789 | 2020 | [84] |
| PM10 | OEMS | 1h | 2M | 0,5038 | 2018 | [85] |
| PM10 | OEMS | 1h | 2M | 0,4827 | 2018 | [85] |
| PM10 | OEMS | 1h | 2M | 0,5333 | 2018 | [85] |
| PM10 | OEMS | 1h | 2M | 0,2769 | 2018 | [85] |
| PM10 | OEMS | 1h | 2M | 0,2756 | 2018 | [85] |
| PM10 | OEMS | 1h | 2M | 0,2882 | 2018 | [85] |
| PM10 | OEMS | 1h | 2M | 0,4615 | 2018 | [85] |
| PM10 | OEMS | 1h | 2M | 0,4514 | 2018 | [85] |
| PM10 | OEMS | 1h | 2M | 0,4858 | 2018 | [85] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,4246 | 2020 | [87] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,4228 | 2020 | [87] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,4238 | 2020 | [87] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2514 | 2020 | [89] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2519 | 2020 | [89] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2558 | 2020 | [89] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,184 | 2020 | [89] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1905 | 2020 | [89] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1933 | 2020 | [89] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1689 | 2018 | [91] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1726 | 2018 | [91] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1564 | 2018 | [91] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2057 | 2018 | [91] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2075 | 2018 | [91] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1724 | 2018 | [91] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0644 | 2018 | [91] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0659 | 2018 | [91] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0588 | 2018 | [91] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,3744 | 2020 | [95] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,35 | 2020 | [95] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,3653 | 2020 | [95] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2955 | 2020 | [96] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2405 | 2020 | [96] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2736 | 2020 | [96] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,3314 | 2020 | [96] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2669 | 2020 | [96] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,3261 | 2020 | [96] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,8711 | 2019 | [98] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,9001 | 2019 | [98] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,903 | 2019 | [98] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1247 | 2019 | [98] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1425 | 2019 | [98] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1781 | 2019 | [98] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2571 | 2019 | [98] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,27 | 2019 | [98] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,3087 | 2019 | [98] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0893 | 2020 | [99] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0463 | 2020 | [99] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0033 | 2020 | [99] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0621 | 2020 | [99] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0239 | 2020 | [99] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0079 | 2020 | [99] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,3691 | 2020 | [100] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,4042 | 2020 | [100] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,3775 | 2020 | [100] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,201 | 2020 | [100] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2264 | 2020 | [100] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2065 | 2020 | [100] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,07 | 2019 | [103] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,067 | 2019 | [103] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0705 | 2019 | [103] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0377 | 2019 | [103] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0379 | 2019 | [103] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0401 | 2019 | [103] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,096 | 2019 | [103] |

| | | | | | | |
|------|------|----|----|--------|------|-------|
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0956 | 2019 | [103] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0991 | 2019 | [103] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2098 | 2020 | [104] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1435 | 2020 | [104] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1403 | 2020 | [104] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2126 | 2020 | [104] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1543 | 2020 | [104] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1607 | 2020 | [104] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1473 | 2019 | [105] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1616 | 2019 | [105] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1468 | 2019 | [105] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1842 | 2019 | [105] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,2366 | 2019 | [105] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1894 | 2019 | [105] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,3495 | 2019 | [105] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,4139 | 2019 | [105] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,3652 | 2019 | [105] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1336 | 2019 | [106] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1234 | 2019 | [106] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1215 | 2019 | [106] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1763 | 2019 | [106] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1712 | 2019 | [106] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1785 | 2019 | [106] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,3379 | 2019 | [106] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,3376 | 2019 | [106] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,3505 | 2019 | [106] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1013 | 2020 | [107] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0434 | 2020 | [107] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0907 | 2020 | [107] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0706 | 2020 | [107] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0384 | 2020 | [107] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,0324 | 2020 | [107] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1134 | 2018 | [109] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1156 | 2018 | [109] |
| PM10 | SSys | 1h | 2M | 0,1121 | 2018 | [109] |
| PM25 | SSys | 1h | 3M | 0,8745 | 2018 | [78] |
| PM25 | SSys | 1h | 3M | 0,8484 | 2018 | [78] |
| PM25 | SSys | 1h | 3M | 0,8042 | 2018 | [78] |
| PM25 | SSys | 1h | 3M | 0,8562 | 2018 | [78] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,4697 | 2020 | [82] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6112 | 2020 | [82] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,5608 | 2020 | [82] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7127 | 2018 | [83] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7031 | 2018 | [83] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7129 | 2018 | [83] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,682 | 2018 | [83] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6866 | 2018 | [83] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6797 | 2018 | [83] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7825 | 2018 | [83] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7909 | 2018 | [83] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7801 | 2018 | [83] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8991 | 2020 | [84] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8677 | 2020 | [84] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8717 | 2020 | [84] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8603 | 2020 | [84] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7744 | 2020 | [84] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7838 | 2020 | [84] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,6176 | 2018 | [85] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,6053 | 2018 | [85] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,6911 | 2018 | [85] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,4064 | 2018 | [85] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,4232 | 2018 | [85] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,4801 | 2018 | [85] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,535 | 2018 | [85] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,5511 | 2018 | [85] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,6243 | 2018 | [85] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,887 | 2020 | [87] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,9032 | 2020 | [87] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,9058 | 2020 | [87] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8869 | 2020 | [89] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8975 | 2020 | [89] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8988 | 2020 | [89] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7848 | 2020 | [89] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7918 | 2020 | [89] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7919 | 2020 | [89] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7202 | 2018 | [91] |

| | | | | | | |
|------|------|----|----|--------|------|-------|
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7105 | 2018 | [91] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7178 | 2018 | [91] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6292 | 2018 | [91] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6464 | 2018 | [91] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6233 | 2018 | [91] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,5175 | 2018 | [91] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,546 | 2018 | [91] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,5174 | 2018 | [91] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,4696 | 2019 | [92] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,4727 | 2019 | [92] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,5692 | 2019 | [92] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,2595 | 2019 | [92] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,26 | 2019 | [92] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,3364 | 2019 | [92] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8653 | 2018 | [93] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8546 | 2018 | [93] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,852 | 2018 | [93] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6783 | 2018 | [93] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6366 | 2018 | [93] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6148 | 2018 | [93] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8426 | 2018 | [94] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,846 | 2018 | [94] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8399 | 2018 | [94] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7137 | 2018 | [94] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7436 | 2018 | [94] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7208 | 2018 | [94] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,9298 | 2020 | [95] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,9203 | 2020 | [95] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,9253 | 2020 | [95] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8375 | 2020 | [96] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8272 | 2020 | [96] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8238 | 2020 | [96] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8489 | 2020 | [96] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8083 | 2020 | [96] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8386 | 2020 | [96] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6861 | 2020 | [97] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7109 | 2020 | [97] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,9085 | 2020 | [97] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7835 | 2020 | [97] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8113 | 2020 | [97] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8938 | 2020 | [97] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8682 | 2019 | [98] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8687 | 2019 | [98] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8757 | 2019 | [98] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,5928 | 2019 | [98] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6002 | 2019 | [98] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6254 | 2019 | [98] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8428 | 2019 | [98] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8422 | 2019 | [98] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8576 | 2019 | [98] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,1728 | 2020 | [99] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,2103 | 2020 | [99] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,0284 | 2020 | [99] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,1301 | 2020 | [99] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,1497 | 2020 | [99] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,027 | 2020 | [99] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8107 | 2020 | [100] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8882 | 2020 | [100] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8464 | 2020 | [100] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7393 | 2020 | [100] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8102 | 2020 | [100] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7686 | 2020 | [100] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,6377 | 2019 | [101] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,657 | 2019 | [101] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,6557 | 2019 | [101] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,5456 | 2019 | [101] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,5448 | 2019 | [101] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,5501 | 2019 | [101] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,7048 | 2019 | [101] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,7251 | 2019 | [101] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,7255 | 2019 | [101] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,8342 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,8289 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,8301 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,6441 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,6433 | 2019 | [102] |

| | | | | | | |
|------|------|----|----|--------|------|-------|
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,6475 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,8345 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,8362 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,8408 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,1235 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,1154 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,1186 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,1134 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,1072 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,1121 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,2493 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,241 | 2019 | [102] |
| PM25 | OEMS | 1h | 2M | 0,2479 | 2019 | [102] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7984 | 2019 | [103] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7854 | 2019 | [103] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7959 | 2019 | [103] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7127 | 2019 | [103] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7105 | 2019 | [103] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,719 | 2019 | [103] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7899 | 2019 | [103] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7853 | 2019 | [103] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7949 | 2019 | [103] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7556 | 2020 | [104] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7473 | 2020 | [104] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7551 | 2020 | [104] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6659 | 2020 | [104] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7079 | 2020 | [104] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,773 | 2020 | [104] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7501 | 2019 | [105] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7455 | 2019 | [105] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7808 | 2019 | [105] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7007 | 2019 | [105] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7245 | 2019 | [105] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7401 | 2019 | [105] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,782 | 2019 | [105] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8118 | 2019 | [105] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8351 | 2019 | [105] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7027 | 2019 | [106] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6735 | 2019 | [106] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7449 | 2019 | [106] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6621 | 2019 | [106] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6649 | 2019 | [106] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7605 | 2019 | [106] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7491 | 2019 | [106] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,746 | 2019 | [106] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8457 | 2019 | [106] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8568 | 2020 | [107] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8377 | 2020 | [107] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8485 | 2020 | [107] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7091 | 2020 | [107] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6346 | 2020 | [107] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6188 | 2020 | [107] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8563 | 2018 | [109] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8703 | 2018 | [109] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8544 | 2018 | [109] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,5929 | 2018 | [109] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6356 | 2018 | [109] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,5769 | 2018 | [109] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7327 | 2018 | [110] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7579 | 2018 | [110] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7384 | 2018 | [110] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6561 | 2018 | [111] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8152 | 2018 | [111] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8656 | 2018 | [111] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6605 | 2018 | [111] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7403 | 2018 | [111] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6918 | 2018 | [111] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7576 | 2018 | [111] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7277 | 2018 | [111] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,6929 | 2018 | [111] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8236 | 2018 | [111] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,8097 | 2018 | [111] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7747 | 2018 | [111] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7825 | 2020 | [112] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7901 | 2020 | [112] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,7663 | 2020 | [112] |

| | | | | | | |
|------|------|----|----|--------|------|-------|
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,9199 | 2020 | [112] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,9146 | 2020 | [112] |
| PM25 | SSys | 1h | 2M | 0,9111 | 2020 | [112] |

B.3. Tabelle zu Abbildung 20

| Kalibriert | Schadstoff | OEMS/ SSys | Mittelung | Zeitraum | R ² | Jahr | Referenz |
|------------|------------|------------|-----------|----------|----------------|------|----------|
| RF | O3 | OEMS | 1h | 2M | N/A | 2020 | [71] |
| RF | CO | OEMS | 1h | 2M | N/A | 2020 | [71] |
| RF | O3 | OEMS | 1h | 7M | N/A | 2020 | [73] |
| RF | CO | OEMS | 1h | 7M | N/A | 2020 | [73] |
| RF | PM25 | OEMS | 1h | 7M | N/A | 2020 | [73] |
| RF | CO | SSys | 15min | 1,5M | 0,91 | 2018 | [52] |
| RF | NO2 | SSys | 15min | 1M | 0,67 | 2018 | [52] |
| RF | O3 | SSys | 15min | 1,5M | 0,86 | 2018 | [52] |
| RF | NO2 | OEMS | 1h | 4M | 0,85 | 2018 | [? ?] |
| RF | PM25 | SSys | 1h | 1,5J | 0,89 | 2020 | [12] |
| RF | PM25 | OEMS | 1h | 7M | 0,85 | 2021 | [76] |
| RF | PM25 | OEMS | 1h | 7M | 0,63 | 2021 | [76] |
| RF | PM25 | SSys | 1h | 1M | 0,44 | 2021 | [77] |
| RF | NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,71 | 2021 | [70] |
| RF | O3 | SSys | 1h | 2M | 0,93 | 2021 | [70] |
| RF | CO | SSys | 1h | 1M | 0,934 | 2021 | [14] |
| RF | NO2 | SSys | 1h | 1M | 0,904 | 2021 | [14] |
| RF | PM10 | SSys | 1h | 1M | 0,767 | 2021 | [14] |
| RF | CO | SSys | 1h | 1M | 0,97 | 2021 | [14] |
| RF | NO2 | SSys | 1h | 1M | 0,943 | 2021 | [14] |
| RF | PM10 | SSys | 1h | 1M | 0,891 | 2021 | [14] |
| RF | CO | SSys | 1h | 1M | 0,927 | 2021 | [14] |
| RF | NO2 | SSys | 1h | 1M | 0,817 | 2021 | [14] |
| RF | PM10 | SSys | 1h | 1M | 0,731 | 2021 | [14] |
| RF | CO | SSys | 1h | 1M | 0,949 | 2021 | [14] |
| RF | NO2 | SSys | 1h | 1M | 0,914 | 2021 | [14] |
| RF | PM10 | SSys | 1h | 1M | 0,824 | 2021 | [14] |
| MLR | O3 | OEMS | 1h | 2M | N/A | 2020 | [71] |
| MLR | CO | OEMS | 1h | 2M | N/A | 2020 | [71] |
| MLR | NO2 | SSys | 1h | 1J | 0,51 | 2019 | [66] |
| MLR | O3 | OEMS | 1h | 7M | 0,7396 | 2020 | [73] |
| MLR | CO | OEMS | 1h | 7M | 0,7744 | 2020 | [73] |
| MLR | PM25 | OEMS | 1h | 7M | 0,7744 | 2020 | [73] |
| MLR | NO2 | OEMS | 5min | 11D | 0,84 | 2018 | [72] |
| MLR | CO | OEMS | 5min | 11D | 0,96 | 2018 | [72] |
| MLR | O3 | OEMS | 5min | 11D | 0,7 | 2018 | [72] |
| MLR | NO2 | OEMS | 5min | 11D | 0,79 | 2018 | [72] |
| MLR | CO | OEMS | 5min | 11D | 0,98 | 2018 | [72] |
| MLR | O3 | OEMS | 5min | 11D | 0,73 | 2018 | [72] |
| MLR | NO2 | OEMS | 5min | 11D | 0,87 | 2018 | [72] |
| MLR | CO | OEMS | 5min | 11D | 0,97 | 2018 | [72] |
| MLR | O3 | OEMS | 5min | 11D | 0,73 | 2018 | [72] |
| MLR | NO2 | OEMS | 5min | 11D | 0,87 | 2018 | [72] |
| MLR | CO | OEMS | 5min | 11D | 0,98 | 2018 | [72] |
| MLR | O3 | OEMS | 5min | 11D | 0,72 | 2018 | [72] |
| MLR | CO | OEMS | 1min | 2M | 0,808 | 2020 | [74] |
| MLR | CO | OEMS | 1min | 3M | 0,743 | 2020 | [74] |
| MLR | CO | OEMS | 1h | 2M | 0,864 | 2020 | [74] |
| MLR | CO | OEMS | 1h | 3M | 0,92 | 2020 | [74] |
| MLR | NO2 | OEMS | 1min | 2M | 0,855 | 2020 | [74] |
| MLR | NO2 | OEMS | 1min | 3M | 0,906 | 2020 | [74] |
| MLR | NO2 | OEMS | 1h | 2M | 0,914 | 2020 | [74] |
| MLR | NO2 | OEMS | 1h | 3M | 0,944 | 2020 | [74] |
| MLR | O3 | OEMS | 1min | 2M | 0,845 | 2020 | [74] |
| MLR | O3 | OEMS | 1min | 3M | 0,932 | 2020 | [74] |
| MLR | O3 | OEMS | 1h | 2M | 0,882 | 2020 | [74] |
| MLR | O3 | OEMS | 1h | 3M | 0,945 | 2020 | [74] |
| MLR | CO | OEMS | 1min | 2M | 0,872 | 2020 | [74] |
| MLR | CO | OEMS | 1h | 2M | 0,897 | 2020 | [74] |
| MLR | NO2 | OEMS | 1min | 2M | 0,813 | 2020 | [74] |
| MLR | NO2 | OEMS | 1h | 2M | 0,904 | 2020 | [74] |
| MLR | O3 | OEMS | 1min | 2M | 0,868 | 2020 | [74] |
| MLR | O3 | OEMS | 1h | 2M | 0,906 | 2020 | [74] |
| MLR | NO2 | OEMS | 1min | 2M | 0,857 | 2020 | [74] |
| MLR | NO2 | OEMS | 1h | 2M | 0,939 | 2020 | [74] |
| MLR | O3 | OEMS | 1min | 2M | 0,845 | 2020 | [74] |
| MLR | O3 | OEMS | 1h | 2M | 0,882 | 2020 | [74] |
| MLR | CO | OEMS | 1min | 2M | 0,85 | 2020 | [74] |
| MLR | CO | OEMS | 1h | 2M | 0,882 | 2020 | [74] |
| MLR | NO2 | OEMS | 1min | 2M | 0,832 | 2020 | [74] |
| MLR | NO2 | OEMS | 1h | 2M | 0,916 | 2020 | [74] |
| MLR | O3 | OEMS | 1min | 2M | 0,862 | 2020 | [74] |
| MLR | O3 | OEMS | 1h | 2M | 0,902 | 2020 | [74] |

| | | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|-------|------|--------|
| MLR | CO | OEMS | 1min | 2M | 0,88 | 2020 | [74] |
| MLR | CO | OEMS | 1h | 2M | 0,913 | 2020 | [74] |
| MLR | NO2 | OEMS | 1min | 2M | 0,799 | 2020 | [74] |
| MLR | NO2 | OEMS | 1h | 2M | 0,889 | 2020 | [74] |
| MLR | O3 | OEMS | 1min | 2M | 0,928 | 2020 | [74] |
| MLR | O3 | OEMS | 1h | 2M | 0,896 | 2020 | [74] |
| MLR | NO2 | OEMS | 1h | 4M | 0,76 | 2018 | [? ?] |
| MLR | PM25 | SSys | 1h | 1,5J | 0,76 | 2020 | [12] |
| MLR | PM25 | OEMS | 1h | 7M | 0,83 | 2021 | [76] |
| MLR | PM25 | OEMS | 1h | 7M | 0,62 | 2021 | [76] |
| MLR | NO2 | SSys | 1h | 2M | 0,69 | 2021 | [70] |
| MLR | O3 | SSys | 1h | 2M | 0,93 | 2021 | [70] |