



# ABSCHLUSSBERICHT

zum eUVM-Teilprojekt „Einsatz von  
Sensorsystemen in einem Landesmessnetz zur  
Überwachung der Luftgüte“

Senatsverwaltung  
für Mobilität, Verkehr,  
Klimaschutz und Umwelt

**BERLIN**



# IMPRESSUM

## **HERAUSGEBERIN**

Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr,  
Klimaschutz und Umwelt  
Berliner Luftgütemessnetz  
Brückenstraße 6  
10179 Berlin  
[www.berlin.de/sen/mvku/](http://www.berlin.de/sen/mvku/)

## **BEARBEITUNG**

Dr. Michael Hofmann, Philipp Guse, Sebastian Clemen, Marcel Krysiak, Dr. Katja Grunow, Dr. Heike Kaupp

## **BILDNACHWEISE**

Fotos: Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt

## **STAND**

12/2025

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	2
1 Zusammenfassung .....	3
2 Zielsetzung und zeitlicher Ablauf .....	4
3 Projektphase 1: Auswahl von Sensorsystemen und von Auftragnehmern für die folgenden Phasen.....	5
3.1 Definition von Mindestanforderungen.....	5
3.2 Vorauswahl von Sensorsystemen.....	6
3.3 Vergleichsmessungen, Datenflüsse und Betriebskonzept .....	9
3.4 Auswahl geeigneter Sensorsysteme.....	11
3.4.1 Ergebnis der Vergleichsmessungen .....	11
3.4.2 Bewertung der Betriebskonzepte.....	17
3.4.3 Bewertung der Sensorsysteme und Auswahl eines Sensorsystems .....	22
4 Projektphase 2: Herstellung der Voraussetzungen für die Integration in das Luftgütemessnetz.....	24
4.1 Prüfung der Standortspezifität und Langzeitstabilität .....	24
4.1.1 Stickstoffdioxid (NO <sub>2</sub> ) .....	26
4.1.2 Partikel PM <sub>10</sub> .....	28
4.1.3 Partikel PM <sub>2,5</sub> .....	30
4.1.4 Zusammenfassung .....	32
4.2 Anwendung und Erweiterung des Betriebskonzepts sowie Erweiterung der Datenflüsse .....	32
4.3 Messergebnisse der weiterbetriebenen Sensorsysteme.....	33
5 Vorzeitige Beendigung des Projekts .....	35
6 Abbildungsverzeichnis .....	36
7 Tabellenverzeichnis .....	37

# 1 ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Bericht dokumentiert die Durchführung und Ergebnisse des Teilprojekts „Einsatz von Sensorsystemen in einem Landesmessnetz zur Überwachung der Luftgüte“, das im Rahmen des erweiterten umweltsensitiven Verkehrsmanagementsystems (eUVM) der Berliner Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt durchgeführt wurde. Ziel des Projekts war es, den praktischen Nutzen und die technische Eignung von Luftqualitätssensorsystemen für den Betrieb im Berliner Luftgütemessnetz (BLUME) zu bewerten. Die so gewonnenen Daten sollten künftig in Verkehrsmanagementmaßnahmen einfließen und hochaufgelöste Informationen über Luftschadstoffbelastungen liefern.

Das Projekt war in drei aufeinanderfolgende Phasen gegliedert:

1. Auswahl von Sensorsystemen und von Auftragnehmern für die folgenden Phasen,
2. Herstellung der Voraussetzungen für die Integration in das Luftgütemessnetz,
3. angestrebter Regelbetrieb.

Das Projekt wurde nach Abschluss von Phase 2 vorzeitig beendet, da sich wesentliche Anforderungen an Datenqualität, Stabilität und Vergleichbarkeit nicht erfüllen ließen.

In Phase 1 wurden durch eine öffentliche Ausschreibung insgesamt fünf Anbieter bewertet. Mit den drei besten Anbietern von Sensorsystemen - Bosch, Hawa Dawa und Smart City Factory - wurden für Vergleichsmessungen an zwei Messstationen des BLUME ausgewählt. Zentrale Bestandteile dieser Phase waren:

- die Durchführung von Vergleichsmessungen mit Referenzverfahren an zwei Standorten (MC117 - verkehrsnah, MC171 - städtischer Hintergrund),
- die Bewertung der Datenqualität anhand des Bestimmtheitsmaßes und der erweiterten Messunsicherheit,
- die Bewertung von Betriebskonzepten hinsichtlich Qualitätssicherung, Wartung und Datenverarbeitung.

Die Ergebnisse zeigten erhebliche Qualitätsunterschiede sowohl zwischen den Anbietern als auch zwischen baugleichen Geräten desselben Typs. Während einzelne Systeme in bestimmten Komponenten zufriedenstellend abschnitten, war eine übergreifende Vergleichbarkeit nicht gegeben. Bosch zeigte dennoch insgesamt die besten Resultate bei Datenstabilität und Betriebskonzept. Daher wurde beschlossen, in Phase 2 ausschließlich mit Bosch-Systemen weiterzuarbeiten.

In der zweiten Projektphase wurden sechs Sensorsysteme von Bosch an Standorten des BLUME-Messnetzes installiert und über mehrere Monate getestet. Ziel war es, ihre Praxistauglichkeit im Dauereinsatz unter realen Bedingungen an verschiedenen Standorten zu bewerten.

Trotz eines umfangreichen Betriebskonzepts zeigten sich gravierende Schwächen:

- Technische Ausfälle traten bei mehreren Geräten auf, teils verbunden mit längeren Ausfallzeiten.
- Instabile Messwerte führten zu erheblichen Schwankungen in der Datenqualität, die nicht durch Umwelteinflüsse erklärbar waren.
- Fehlende Vergleichbarkeit zeigte sich erneut: Baugleiche Systeme lieferten an identischen Standorten teils deutlich voneinander abweichende Messwerte.

Diese Abweichungen waren in erster Linie auf technische Defekte und die unzureichende Langzeitstabilität der Sensorik zurückzuführen. Die Systeme zeigten zudem eine Drift im Zeitverlauf, was die Interpretation und Validierung der Daten zusätzlich erschwerte. Eine gerätespezifische Kalibrierung und eine kontinuierliche Betreuung der Sensorsysteme wäre erforderlich gewesen, um die Qualität dauerhaft sicherzustellen – ein Aufwand, der im Rahmen des Projekts nicht realisierbar war.

Das von Bosch eingesetzte Betriebskonzept erwies sich als nicht ausreichend flexibel, um auf diese Probleme adäquat zu reagieren. Erweiterungen, etwa zur Qualitätssicherung, wären mit hohem Aufwand verbunden gewesen. Zudem wurde der eingesetzte Gerätetyp im Laufe des Projekts abgekündigt, eine Umstellung auf ein Nachfolgemodell hätte einen vollständigen Neustart erfordert. Angesichts dieser Rahmenbedingungen wurde die geplante Betriebsphase nicht mehr umgesetzt.

Das Projekt hat gezeigt, dass die getesteten Sensorsysteme unter realen Bedingungen nicht die nötige Datenqualität, Vergleichbarkeit und Betriebssicherheit für den Einsatz in einem Landesmessnetz bieten. Trotz technischer Fortschritte bleiben zentrale Anforderungen wie Stabilität, Wartungsarmut und Homogenität zwischen Geräten unerfüllt. Das Projekt wurde im Juni 2023 abgeschlossen, alle eingesetzten Systeme wurden außer Betrieb genommen.

## 2 ZIELSETZUNG UND ZEITLICHER ABLAUF

Luftqualitätssensorsysteme als Messeinrichtungen zur Echtzeiterfassung von gasförmigen Luftschadstoffen sowie von Partikeln (PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub>) werden von einer zunehmenden Anzahl von Herstellern in sehr unterschiedlicher messtechnischer Komplexität kommerziell angeboten. Die Möglichkeiten und Grenzen solcher Systeme sind prinzipiell bekannt<sup>1</sup> und mit der im April 2022 veröffentlichten DIN CEN/TS 17660-1<sup>2</sup> sind erste direkt sichtbare Erfolge auf dem Weg zu einer standardisierten Prüfung von Luftqualitätssensorsystemen zu verzeichnen. Weitgehend ungeklärt sind bislang jedoch der Umfang und die Häufigkeit von Maßnahmen zur laufenden Qualitätssicherung der Messungen mit Sensorsystemen und die Möglichkeiten zur Integration der Sensorsysteme in bestehende reguläre Luftgütemessnetze, die gemäß 39. BImSchV betrieben werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Aufbau und Betrieb eines erweiterten umweltsensitiven Verkehrsmanagementsystems in Berlin“ (eUVM)<sup>3</sup> der Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt hat das Berliner Luftgütemessnetz (BLUME) die Möglichkeit erhalten, in einem eigenen Teilprojekt die Eignung von Luftqualitätssensorsystemen unter den Bedingungen, wie sie im Berliner Luftgütemessnetz vorherrschen, zu erproben.

Im Projekt sollte die Möglichkeit untersucht werden, definierte Untersuchungsräume mit geeigneten Sensorsystemen zur Überwachung der Luftqualität auszustatten, die räumlich und zeitlich hochaufgelöste und valide Messdaten zur Luftqualität generieren. Die erhobenen Messdaten sollten unter anderem als Eingangsdaten für Maßnahmen des umweltsensitiven Verkehrsmanagements dienen. Mit ihrer Hilfe sollten Erkenntnisse zu kleinräumigen Immissionsituationen, die aktuell anhand von Ausbreitungsmodellen erhoben werden, validiert und die Ausbreitungsmodelle optimiert werden. Zur effektiven Umsetzung der Ziele waren die Messungen mit den Sensorsystemen an die Datenerfassung anzubinden, um somit eine Validierung und Qualitätssicherung in Anlehnung an die Routinemessungen des Berliner Luftgütemessnetzes anzuwenden. Der Aspekt der Grenzwertüberwachung gemäß der 39. BImSchV stand dabei im Hintergrund.

Zum Erreichen der Ziele wurde das Projekt in drei Projektphasen gegliedert. In der ersten Projektphase wurden geeignete Sensorsysteme zur Prüfung der Luftqualität identifiziert und Betreiber solcher Systeme für die anschließenden Projektphasen ausgewählt. In der zweiten Projektphase wurden die Voraussetzungen für die Integration der Sensorsysteme in das Luftgütemessnetz geschaffen. Die dritte Projektphase sah der Regelbetrieb vor, um Messdaten für die verschiedenen Anwendungsfälle zu erheben. In Tabelle 1 ist der geplante zeitliche Projektverlauf aufgeführt.

**Tabelle 1: Geplanter zeitlicher Ablauf des Projekts**

Datum	Was
<b>Phase 1</b>	
06.06. - 19.06.2022	Aufbau und Inbetriebnahme der je 3 Sensorsysteme an 2 Standorten
20.06. - 01.07.2022	Messungen Phase 1 - Einlauf-/Kalibrierphase
01.07. - 01.09.2022	Messungen Phase 1 (zwei Monate)
01.09. - 01.10.2022	Wahrgenommene Option zur Verlängerung des Betriebs der Sensorsysteme (ein Monat)
01.10.2022 - 16.10.2022	Auswertung der Ergebnisse und kostenneutraler Weiterbetrieb der Messsysteme
17.10.2022	Mitteilung des Ergebnisses der Vergleichsmessungen
bis 06.11.2022	Ggf. Rückbau der Sensorsysteme
<b>Phase 2</b>	
07.11.2022	Beginn Phase 2
ab 07.11.2022	Aufbau von Sensorsystemen an weiteren Standorten
21.11.2022 - 05.03.2023	Messungen Phase 2
06.03.2023	Ende Phase 2
<b>Phase 3</b>	
07.03.2023	Beginn Phase 3
01.11.2024	Ende Phase 3

<sup>1</sup> VDI (2021): Sensorsysteme zur Messung der Luftqualität - Konkurrenz zu behördlichen Messungen oder sinnvolle Ergänzung?; <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/sensorsysteme-zur-messung-der-luftqualitaet-konkurrenz-zu-behoerdlichen-messungen-oder-sinnvolle-ergaenzung>

<sup>2</sup> <https://www.beuth.de/de/vornorm/din-cen-ts-17660-1/339188269>

<sup>3</sup> <https://testfeldstadtverkehr.berlin/euvm/>

# 3 PROJEKTPHASE 1: AUSWAHL VON SENSORSYSTEMEN UND VON AUFTRAGNEHMERN FÜR DIE FOLGENDEN PHASEN

In der ersten Projektphase (Phase 1) wurden geeignete Sensorsysteme und Auftragnehmer für den Betrieb von Luftqualitäts-sensorsystemen gesucht. Dazu wurde über eine öffentliche Ausschreibung eine Vorauswahl von drei Sensorsystemen getroffen, die bestimmte Mindestanforderungen erfüllen. Um die Eignung der Sensorsysteme unter den Bedingungen im Berliner Luftgütemessnetz zu prüfen und die endgültige Auswahl von mindestens einem Sensorsystem zu treffen, wurden im Hauptteil der Phase 1 mit den vorausgewählten Sensorsystemen Vergleichsmessungen mit Referenzverfahren bzw. nachweislich äquivalenten Verfahren durchgeführt. Ferner waren von den Betreibern während der Vergleichsmessungen Betriebskonzepte für die Sensorsysteme zu entwickeln.

## 3.1 Definition von Mindestanforderungen

Da die messtechnische Komplexität und Leistungsfähigkeit kommerzieller Luftqualitätssensorsysteme sehr heterogen ist, wurden für den Vorauswahlprozess (Abschnitt 3.2) Mindestanforderungen definiert, die nachweislich von den angebotenen Sensorsystemen zu erfüllen waren. Geeignete Sensorsysteme müssen die Komponenten  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  und  $\text{PM}_{2,5}$  mit einem kombinierten Gerät oder mehreren Einzelgeräten erfassen und per Datenfernübertragung über das Internet zur Verfügung stellen. Die Mindestanforderungen geeigneter Sensorsysteme sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Sie orientieren sich an den Datenqualitätskriterien für Sensorsysteme der Klasse 2 gemäß DIN CEN/TS 17660-1<sup>4</sup> (für die anorganischen Gase) und einem Prüfprotokoll von INERIS<sup>5</sup> (für Partikel  $\text{PM}_{10}$  und  $\text{PM}_{2,5}$ ). Die Einhaltung der Mindestanforderungen war anhand eines Datenblattes nachzuweisen. Nachweise über die Einhaltung waren durch die Auftragnehmer in geeigneter Form zu erbringen. Darüber hinaus war ein Datensatz einer Vergleichsmessung mit einem Referenzverfahren (gem. 39. BImSchV bzw. Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa) oder einem nachweislich äquivalenten Verfahren unter Feldbedingungen vorzulegen. Die Typenbezeichnungen der verwendeten Messmittel der Referenzverfahren oder äquivalenten Verfahren waren zu nennen. Das Zeitintervall der Messung musste mindestens 28 Tage beinhalten und eine zeitliche Auflösung von einer Stunde aufweisen. Es wurde gefordert, dass Rohdaten der Sensorsysteme bereitgestellt werden. Wurden beim Regelbetrieb der Sensorsysteme ggf. durch Algorithmen abgeleitete, korrigierte Messdaten erhoben, waren diese zusätzlich einzureichen. Justierungen oder anderweitige am Messsystem vorgenommene Änderungen waren vom Auftragnehmer im Datensatz mit dem Zeitpunkt des Eingriffs zu kennzeichnen.

---

<sup>4</sup> <https://www.beuth.de/de/vornorm/din-cen-ts-17660-1/339188269>

<sup>5</sup> [https://prestations.ineris.fr/sites/prestation.ineris.fr/files/PrestaWeb/Pages-Solution/DSC/Certification%20syst%C3%A8mes%20capteurs%20surveillance%20qt%C3%A9%20air/en\\_gb\\_NEW%20MO1347AAapplicable.pdf](https://prestations.ineris.fr/sites/prestation.ineris.fr/files/PrestaWeb/Pages-Solution/DSC/Certification%20syst%C3%A8mes%20capteurs%20surveillance%20qt%C3%A9%20air/en_gb_NEW%20MO1347AAapplicable.pdf)

**Tabelle 2: Mindestanforderungen an die Sensorsysteme zur Überwachung der Luftgüte zur Teilnahme am Vergabeverfahren**

	Stickstoffdioxid (NO <sub>2</sub> ) in µg/m <sup>3</sup>	Partikel (PM <sub>10</sub> und PM <sub>2,5</sub> ) in µg/m <sup>3</sup>
Messbereich	bis 500	bis 1000
Nachweisgrenze <sup>*)</sup>	< 29	< 10
Wiederholpräzision <sup>*)</sup>	< 11,5 (bei 200 µg/m <sup>3</sup> )	< 10 (bei 80 µg/m <sup>3</sup> )
Linearität <sup>*)</sup>	R <sup>2</sup> > 0,5 (0 bis 300 µg/m <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup> > 0,5 (0 bis 120 µg/m <sup>3</sup> )
zeitliche Auflösung	≤ 1 Stunden-Mittelwerte	
Stromversorgung	230 V, 50 Hz, CEE 7/3-kompatibler Stecker (spritzwassergeschützt, mindestens IP44), Leistungsaufnahme ≤ 200 W oder autark über eigene Photovoltaik-Anlage	
Masse	≤ 25 kg (ein Sensorsystem mit allen Komponenten)	
Volumen	≤ 0,1 m <sup>3</sup> (ein Sensorsystem mit allen Komponenten)	
Befestigungs-möglichkeiten	Installation an Rundrohren mit Außendurchmessern von 42 mm und 40 × 40 mm <sup>2</sup> Vierkant-rohren	
Kompensation der Gasfeuchte	erforderlich (Angabe zur Kompensationsmethode oder zum eingesetzten Messgastrockner ist zu erbringen)	
Bereitstellung von Rohdaten	erforderlich (zusätzlich zu den erhobenen Messwerten, anhand derer die Leistungsfähigkeit geprüft wird, sind im Sinne der Nachvollziehbarkeit der Datenerhebung Rohdaten der verwendeten Sensorelemente bzw. die Eingangsdaten der verwendeten Auswertalgorithmen bereitzustellen)	

<sup>\*)</sup>: Kennzahlen beziehen sich auf Messdaten mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde

### 3.2 Vorauswahl von Sensorsystemen

Mit Hilfe einer öffentlichen Ausschreibung waren maximal drei Betreiber von Sensorsystemen (AN) zu identifizieren, mit denen Messungen im Berliner Luftgütemessnetz durchgeführt werden sollten. Die maximal drei Angebote mussten die Mindestanforderungen (siehe Abschnitt 3.1) nachweislich erfüllen. Beim Eingang von mehr als drei Angeboten wurden die folgenden Bewertungsgrundlagen herangezogen (Auszug aus der Leistungsbeschreibung):

Preis (maximal 100 Punkte): 50 Punkte werden für den Medianwert der Summe der Preise für die Phasen 1-3 (außer der Positionen 1.7 und 1.8 im Preisblatt) aller Angebote vergeben. 0 Punkte erhält ein fiktives Angebot, dessen Angebotspreis das 1,5-fache des Medianwerts aller Angebotspreise überschreitet. 100 Punkte erhält ein fiktives Angebot, dessen Angebotspreis das 0,5-fache des Medianwerts aller Angebotspreise unterschreitet. Die Punktevergabe zwischen den beiden Extremen erfolgt durch lineare Interpolation.

Leistungskriterien (maximal 165 Punkte): Anhand der eingereichten Vergleichsmessungen werden Leistungskenngrößen bzgl. der Messparameter NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub> mittels orthogonaler Regression vom AG abgeleitet und bewertet. Die folgenden Parameter werden bewertet. Für die Messunsicherheit des Referenzverfahrens werden die Mindestanforderungen an die Referenzverfahren gemäß 39. BImSchV bzw. Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa angesetzt.

Das Angebot mit der geringsten erweiterten Messunsicherheit bzgl. NO<sub>2</sub> (bezogen auf 40 µg/m<sup>3</sup>), PM<sub>10</sub> (bezogen auf 50 µg/m<sup>3</sup>) bzw. PM<sub>2,5</sub> (bezogen auf 30 µg/m<sup>3</sup>) erhält jeweils 35 Punkte (in Summe maximal 105 Punkte). 0 Punkte erhält jeweils ein fiktives Angebot, das eine erweiterte Messunsicherheit von 50 %, bezogen auf die Zielwerte, überschreitet.

Das Angebot mit dem größten Bestimmtheitsmaß (R<sup>2</sup>) bzgl. NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> bzw. PM<sub>2,5</sub> erhält jeweils 20 Punkte (in Summe maximal 60 Punkte). 0 Punkte erhält jeweils ein fiktives Angebot, das ein Bestimmtheitsmaß von 0,7 unterschreitet.

Die Punktevergabe zwischen den beiden Extremen erfolgt durch lineare Interpolation.

Zusätzlich kann der AN bereits vorliegende Untersuchungsergebnisse wie z. B. weitere Vergleichsmessungen mit anderen Luftgütemessnetzen und wissenschaftliche Publikationen, aus denen die Leistungsfähigkeit des angebotenen Sensorsystems hervorgeht, einreichen. Je geeigneter Publikation werden bis zu 5 Punkte vergeben. Für einen Bericht eines unabhängigen Prüflabors, der die Leistungsfähigkeit des Sensorsystems für mindestens die Komponenten NO<sub>2</sub> und PM<sub>2,5</sub> darlegt, werden 20 Punkte vergeben. Insgesamt werden in dieser Kategorie jedoch maximal 35 Punkte vergeben.

Im Zuge der öffentlichen Ausschreibung sind fünf Angebote von den folgenden Firmen eingegangen:

Robert Bosch GmbH (Bosch) mit dem eigenentwickelten Sensorsystem „Emissions Monitoring Box“ (IMB),

Hawa Dawa GmbH (HD) mit dem eigenentwickelten Sensorsystem „Sentience“,

CSS Messgeräte Vertriebs-GmbH (CSS) mit dem kommerziellen Sensorsystem Ethera NEMo von der Firma Ethera (Frankreich, ethera-labs.com) und

Green Way Systems GmbH (GWS) und

Smart City Factory GmbH (SCF) jeweils mit dem kommerziellen Sensorsystem Air Quality Transmitter AQT530 von der Firma Vaisala (Finnland, [vaisala.com](http://vaisala.com)).

Die Bewertung der erhaltenen Angebote nach den oben genannten Kriterien ist in der Bewertungsmatrix in Tabelle 2 zusammengefasst. Die drei höchsten Punktzahlen (grün) erhielten die Anbieter HD, Bosch und SCF, mit denen Rahmenverträge für den Betrieb von Sensorsystemen während Vergleichsmessungen in der ersten Projektphase sowie optional in den Phasen 2 und 3 abgeschlossen wurden. Die Auswertung der eingereichten Datensätze der Vergleichsmessungen von Sensorsystemen und Referenz- bzw. Äquivalenzverfahren erfolgte mit dem „EQUIVALENCE TOOL V3.1“<sup>6</sup> von der Europäischen Kommission.

---

<sup>6</sup> EQUIVALENCE TOOL V3.1 020720 (2).XLSX (Version 1.0): Excel-Datei zum Nachweis der Äquivalenz eines Kandidatenverfahrens mit einem Referenzverfahren gemäß 39.BImSchV. Erstellt von David HARRISON Version 1.0 vom 31.05.2022, 11:11; <https://circabc.europa.eu/ui/group/cd69a4b9-1a68-4d6c-9c48-77c0399f225d/library/ece2498e-2ca5-4817-8bfa-30521190f166>

Tabelle 3: Bewertungsmatrix zur Vorauswahl von maximal drei Auftragnehmern für die Messungen im Berliner Luftgütemessnetz während der ersten Projektphase (es wurde keine lineare Korrektur der Messdaten vorgenommen)

Kategorie	Parameter	Punktzahl		Bezugswert		Kenngröße					Punktzahl (PZ)				
		max	min	max. PZ	min. PZ	Bosch	CCS	GWS	HD	SCF	Bosch	CCS	GWS	HD	SCF
Allgemein	Preis	100	0	30.610 €	91.830 €	61.220 €	110.833 €	151.826 €	31.010 €	54.460 €	50	0	0	99	61
NO <sub>2</sub>	erw. Messunsicherheit	35	0	16%	50%	24%	35%	16%	29%	16%	27	16	35	22	35
	Bestimmtheitsmaß	20	0	0,959	0,7	0,905	0,959	0,885	0,793	0,885	16	20	14	7	14
PM <sub>2,5</sub>	erw. Messunsicherheit	35	0	26%	50%	26%	31%	64%	40%	64%	35	27	0	15	0
	Bestimmtheitsmaß	20	0	0,905	0,7	0,905	0,813	0,836	0,789	0,836	20	11	13	9	13
PM <sub>10</sub>	erw. Messunsicherheit	35	0	21%	50%	55%	86%	33%	21%	33%	0	0	21	35	21
	Bestimmtheitsmaß	20	0	0,851	0,7	0,840	0,680	0,851	0,610	0,851	19	0	20	0	20
Zusatz	Publikationen, Vergleichsmessungen, etc.	35	0			25	5	10	15	5	25	5	10	15	5
<b>Summe:</b>		<b>300</b>	<b>0</b>								<b>192</b>	<b>79</b>	<b>113</b>	<b>202</b>	<b>169</b>

**Abkürzungen**

- Bosch Robert Bosch GmbH
- CCS CCS Messgeräte Vertriebs-GmbH
- GWS Green Way Systems GmbH
- HD Hawa Dawa GmbH
- SCF Smart City Factory GmbH
- PZ Punktzahl

### 3.3 Vergleichsmessungen, Datenflüsse und Betriebskonzept

Zur Prüfung der Eignung der vorausgewählten Sensorsysteme wurden vom 01.07.2022 12:00 Uhr bis 01.10.2022 12:00 Uhr Vergleichsmessungen mit Referenzverfahren in Anlehnung an einen Äquivalenzvergleich nach „Guide to the Demonstration of Equivalence of Ambient Air Monitoring Methods“<sup>7</sup> durchgeführt. Als Referenzverfahren für die Komponente NO<sub>2</sub> (DIN EN 14211) wurden Chemilumineszenz-Analysatoren der Fa. Horiba vom Typ APNA 370 verwendet. Für die Komponenten PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub> wurden optische Aerosolspektrometer der Fa. Grimm vom Typ EDM 180 verwendet, die nachweislich äquivalent zum Referenzverfahren (DIN EN 16450) sind. Die Messungen erfolgten an den Standorten DEBE061 (MC117 Schildhornstraße, Verkehr) und DEBE068 (MC171 Mitte, städtischer Hintergrund) des Berliner Luftgütemessnetzes, um den Einfluss der Belastungssituation zu prüfen. Zur Prüfung der Homogenität der drei Typen von Sensorsystemen wurden je Betreiber und Standort jeweils drei Sensorsysteme parallel betrieben. In Abbildung 1 und Abbildung 2 sind die Messstandorte mit den installierten Sensorsystemen dargestellt.



Abbildung 1: Messcontainer DEBE061 (MC117 Schildhornstraße) kurz vor dem Beginn der Vergleichsmessungen der ersten Projektphase am 30.06.2022.

<sup>7</sup> <https://circabc.europa.eu/ui/group/cd69a4b9-1a68-4d6c-9c48-77c0399f225d/library/17ef508b-3aab-450e-b511-72f8a9892d48/details>



**Abbildung 2: Dachansicht des Messcontainers DEBE068 (MC171 Mitte) im Oktober 2022 zur Beendigung der Vergleichsmessungen in der ersten Projektphase.**

Die Zeitbasis des Vergleichs waren Stundenmittelwerte. Den Vergleichsmessungen vorgelagert war vom 20.06.2022 bis zum Beginn der Vergleichsmessung am 01.07.2022 eine Einlauf- bzw. Kalibrierphase, während der die Betreiber der Sensorsysteme die Möglichkeit hatten, eine Kalibrierung und Justierung der Sensorsysteme, basierend auf den Messdaten der Referenzmessstation, durchzuführen.

Hinsichtlich der Datenflüsse wurde mit den Betreibern vereinbart, dass die Erfassung, Verarbeitung und Übertragung der Messdaten von den Sensorsystemen ohne externe anzuschließende Mittel zu erfolgen hatte. Die Übertragung der Messdaten erfolgte anhand einer mindestens stündlich aktualisierten CSV-Datei mit definierter Struktur, die von einem Server mit fester IP-Adresse auf Port 80 oder 443 aus dem Internet abrufbar war. Nach der Vorlaufphase durfte der verwendete Algorithmus zur Datenauswertung inklusive etwaiger Kalibrierfaktoren über den Zeitraum der Vergleichsmessung in Phase 1 nicht verändert werden.

Im Falle technischer Defekte von Sensorsystemen konnten die Betreiber nach Rücksprache mit dem Berliner Luftgütemessnetz maximal zwei Sensorsysteme austauschen. Ein Ausfall von mehr als zwei Sensorsystemen eines Betreibers führte dazu, dass dieses Sensorsystem als ungeeignet für die Projektphasen 2 und 3 erklärt wird.

Aus den Vergleichsmessungen wurden analog zur Vorauswahl der Sensorsysteme (Abschnitt 3.2) Leistungskenngrößen ermittelt und wie folgt bewertet:

- Leistungskriterien (maximal 105 Punkte): Aus der Vergleichsmessung in Phase 1 werden die Kenngrößen erweiterte Messunsicherheit und Bestimmtheitsmaß bzgl.  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  bzw.  $\text{PM}_{2,5}$  bestimmt.
  - Das Angebot mit der geringsten erweiterten Messunsicherheit bzgl.  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{PM}_{10}$  bzw.  $\text{PM}_{2,5}$  erhält jeweils 20 Punkte (in Summe maximal 60 Punkte). 0 Punkte erhält jeweils ein fiktives Angebot, das eine erweiterte Messunsicherheit von 35 %, bezogen auf die Zielwerte, überschreitet.
  - Das Angebot mit dem größten Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) bzgl.  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  bzw.  $\text{PM}_{2,5}$  erhält jeweils 15 Punkte (in Summe maximal 45 Punkte). 0 Punkte erhält jeweils ein fiktives Angebot, das ein Bestimmtheitsmaß von 0,75 unterschreitet.
  - Die Punktevergabe zwischen den beiden Extremen erfolgt durch lineare Interpolation.

Während der Vergleichsmessungen in der ersten Projektphase mussten die Betreiber der Sensorsysteme ein Betriebskonzept erarbeiten, das die Installation, Inbetriebnahme und den Messnetzbetrieb abdeckt. Ein besonderer Fokus ist dabei auf die Umsetzung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung und -kontrolle zu setzen. Dabei sollten die folgenden Aspekte explizit berücksichtigt werden:

- Vergleichsmessungen mit Referenzverfahren
- Validierung/Plausibilitätsprüfungen der Messdaten
- Kalibrierungen und Justierungen der Sensorsysteme
- Dokumentation

Die Bewertung der Betriebskonzepte erfolgte nach den Kategorien Umfänglichkeit und Plausibilität. Der Anbieter mit dem umfangreichsten Betriebskonzept erhält 45 Punkte und jenes mit der höchsten Praktikabilität 50 Punkte (näheres siehe Abschnitt 3.4.2).

Nach Auswertung der Vergleichsmessungen aus der Projektphase 1 und der Bewertung der Betriebskonzepte erfolgte die Auswahl eines Betreibers von Sensorsystemen, der die optionalen Leistungen für die Projektphasen 2 und ggf. 3 durchführt.

### 3.4 Auswahl geeigneter Sensorsysteme

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Vergleichsmessungen und die Bewertung der Betriebskonzepte dargestellt, welche die Grundlage für die Auswahl der Betreiber von Sensorsystemen war, mit denen in den folgenden Projektphasen weitergearbeitet wurde.

#### 3.4.1 Ergebnis der Vergleichsmessungen

Die Auswertung der Datensätze der Vergleichsmessungen von Sensorsystemen und Referenz- bzw. Äquivalenzverfahren an den Messstationen DEBE061 (MC171) und DEBE068 (MC117) des Berliner Luftgütemessnetzes erfolgte mit dem „EQUIVALENCE TOOL V3.1“<sup>8</sup> von der europäischen Kommission. Da das Programm nur einen Vergleich von maximal zwei parallel betriebenen Messsystemen mit maximal zwei Referenzverfahren ermöglicht, wurden zunächst die beiden Sensorsysteme je Standort und Modell identifiziert, die beim Individualvergleich zwischen Sensorsystem und Referenzverfahren die besten Ergebnisse lieferten.

Es war vorgesehen, dass nur jene Sensorsysteme berücksichtigt werden, die eine Datenverfügbarkeit von mindestens 90% aufwiesen. In Tabelle 4 ist die Datenverfügbarkeit während des 92-tägigen Zeitraums der Vergleichsmessung aufgeführt.

**Tabelle 4: Datenverfügbarkeit der Sensorsysteme während der Vergleichsmessungen in der ersten Projektphase (schwarz hinterlegte Sensorsysteme wurden aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit nicht bewertet).**

Station	Sensor-Nummer	Komponente	Bosch	Hawa Dawa	Smart City Factory
MC117	1	NO <sub>2</sub>	99,8%	99,1%	99,7%
		PM <sub>10</sub>	99,7%	99,0%	99,7%
		PM <sub>2,5</sub>	99,7%	99,0%	99,7%
	2	NO <sub>2</sub>	88,3%	99,1%	99,7%
		PM <sub>10</sub>	89,4%	99,0%	99,7%
		PM <sub>2,5</sub>	89,4%	99,0%	99,7%
	3	NO <sub>2</sub>	71,1%	98,6%	99,7%
		PM <sub>10</sub>	70,9%	98,5%	99,7%
		PM <sub>2,5</sub>	70,9%	98,5%	99,7%
MC171	1	NO <sub>2</sub>	99,8%	99,7%	99,8%
		PM <sub>10</sub>	100,0%	99,9%	100,0%
		PM <sub>2,5</sub>	100,0%	99,9%	100,0%
	2	NO <sub>2</sub>	99,8%	99,7%	99,8%
		PM <sub>10</sub>	100,0%	99,9%	100,0%
		PM <sub>2,5</sub>	100,0%	99,9%	100,0%
	3	NO <sub>2</sub>	99,8%	99,6%	99,7%
		PM <sub>10</sub>	100,0%	99,9%	100,0%
		PM <sub>2,5</sub>	100,0%	99,9%	100,0%

<sup>8</sup> EQUIVALENCE TOOL V3.1 020720 (2).XLSX (Version 1.0): Excel-Datei zum Nachweis der Äquivalenz eines Kandidatenverfahrens mit einem Referenzverfahren gemäß 39.BImSchV. Erstellt von David HARRISON Version 1.0 vom 31.05.2022, 11:11; <https://circabc.europa.eu/ui/group/cd69a4b9-1a68-4d6c-9c48-77c0399f225d/library/ece2498e-2ca5-4817-8bfa-30521190f166>

Das Datenverfügbarkeitskriterium von 90% (Verhältnis der Anzahl der ermittelten 1-Stunden-Messwerte zur Anzahl der maximal möglichen 1-Stunden-Messwerte im Bewertungszeitraum) wurde von zwei Sensorsystemen der Fa. Bosch nicht eingehalten. Von allen anderen Sensoren wurde das Kriterium erfüllt.

Das Sensorsystem 3 der Firma Bosch am MC117 unterschreitet das Verfügbarkeitskriterium von 90% mit ca. 71% deutlich und wurde somit nicht bewertet.

Das Sensorsystem 2 der Firma Bosch am MC117 mit einer Datenverfügbarkeit von ca. 88% wurde hingegen nicht ausgeschlossen, da die verminderte Datenverfügbarkeit nur geringfügig unterhalb des Kriteriums von 90% lag und sie nicht ausschließlich durch den Betreiber verschuldet war. Die reduzierte Datenverfügbarkeit war durch Geräteausfälle bedingt, die nur durch eine Wartung vor Ort behebbar waren. Da für den Zugang zu den Sensorsystemen ein Mitarbeiter des Berliner Luftgütemessnetzes anwesend sein musste und diese nicht direkt nach dem Auftreten des Ausfalls verfügbar waren, gab es Verzögerungen aufgrund der gemeinsamen Terminfindung mit dem Betreiber, welche zu einer Reduktion der Datenverfügbarkeit von deutlich mehr als 2% geführt haben.

Aus dem Individualvergleich der Sensorsysteme mit den Referenzverfahren gingen die in Tabelle 5 gelisteten Datenqualitätskenngrößen (Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) der orthogonalen Regression und erweiterte Messunsicherheit (U) mit einem Erweiterungsfaktor von  $k = 2$ ) hervor.

**Tabelle 5: Datenqualitätskenngrößen „Bestimmtheitsmaß“ ( $R^2$ ) und „erweiterte Messunsicherheit“ (U), die aus der Vergleichsmessung jedes individuellen Sensorsystems mit dem zugehörigen Referenz- bzw. Äquivalenzverfahren aus den Messungen in der ersten Projektphase abgeleitet wurden (schwarz hinterlegte Sensorsysteme wurden aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit nicht bewertet).**

Station	Kennzahl	Komponente	Betreiber bzw. Sensor-Nummer								
			Bosch			Hawa Dawa			Smart City Factory		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
MC117	$R^2$	NO <sub>2</sub>	0,86	0,85	0,80	0,60	0,71	0,51	0,59	0,61	0,58
		PM <sub>10</sub>	0,78	0,79	0,64	0,53	0,52	0,53	0,79	0,68	0,70
		PM <sub>2,5</sub>	0,76	0,79	0,79	0,84	0,84	0,84	0,74	0,40	0,47
	U (k=2)	NO <sub>2</sub>	71,5%	54,0%	48,6%	52,6%	36,5%	55,0%	44,3%	47,0%	77,9%
		PM <sub>10</sub>	40,2%	26,6%	66,8%	58,9%	59,9%	55,6%	61,0%	94,7%	91,6%
		PM <sub>2,5</sub>	28,6%	20,3%	66,9%	12,4%	16,1%	11,7%	105,9%	134,0%	129,9%
MC171	$R^2$	NO <sub>2</sub>	0,84	0,22	0,59	0,30	0,37	0,50	0,40	0,33	0,12
		PM <sub>10</sub>	0,74	0,75	0,78	0,54	0,56	0,56	0,69	0,65	0,74
		PM <sub>2,5</sub>	0,82	0,81	0,81	0,83	0,85	0,86	0,68	0,26	0,70
	U (k=2)	NO <sub>2</sub>	26,1%	74,9%	57,8%	48,6%	40,6%	31,1%	74,0%	47,4%	250,7%
		PM <sub>10</sub>	24,6%	20,7%	23,2%	53,5%	57,9%	56,5%	59,6%	86,0%	64,9%
		PM <sub>2,5</sub>	17,1%	13,4%	14,8%	16,5%	20,8%	20,8%	86,1%	149,3%	95,1%

Basierend auf den Datenqualitätskenngrößen der Individualvergleiche wurden je Betreiber, Standort und Komponente aus den drei parallel messenden Sensoren die Rangfolge (1: Sensorsystem mit der besten Datenqualitätskenngröße; 3: Sensorsystem mit der schlechtesten Datenqualitätskenngröße) der besten Sensoren erzeugt und durch Mittelwertbildung der Ränge das insgesamt beste Sensorsystem ermittelt (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Rangfolge je Standort und Betreiber verwendeten drei Sensorsysteme hinsichtlich der Datenqualitätskenngrößen „Bestimmtheitsmaß“ ( $R^2$ ) und „erweiterte Messunsicherheit“ (U), die aus der Vergleichsmessung jedes individuellen Sensorsystems mit dem zugehörigen Referenz- bzw. Äquivalenzverfahren aus den Messungen in der ersten Projektphase abgeleitet wurden (1: Sensorsystem mit der besten Datenqualitätskenngröße; 3: Sensorsystem mit der schlechtesten Datenqualitätskenngröße).

Station	Kennzahl	Komponente	Betreiber bzw. Sensor-Nummer								
			Bosch			Hawa Dawa			Smart City Factory		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
MC117	$R^2$	NO <sub>2</sub>	1	2	3	2	1	3	2	1	3
		PM <sub>10</sub>	2	1	3	1	3	1	1	3	2
		PM <sub>2,5</sub>	3	1	2	3	1	1	1	3	2
	U (k=2)	NO <sub>2</sub>	3	2	1	2	1	3	1	2	3
		PM <sub>10</sub>	2	1	3	2	3	1	1	3	2
		PM <sub>2,5</sub>	2	1	3	2	3	1	1	3	2
		Mittelwert	<b>2,17</b>	<b>1,33</b>	2,33	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,67</b>	<b>1,17</b>	2,50	<b>2,33</b>
MC171	$R^2$	NO <sub>2</sub>	1	3	2	3	2	1	1	2	3
		PM <sub>10</sub>	3	2	1	3	2	1	2	3	1
		PM <sub>2,5</sub>	1	3	2	3	2	1	2	3	1
	U (k=2)	NO <sub>2</sub>	1	3	2	3	2	1	2	1	3
		PM <sub>10</sub>	3	1	2	1	3	2	1	3	2
		PM <sub>2,5</sub>	3	1	2	1	2	3	1	3	2
		Mittelwert	<b>2,00</b>	2,17	<b>1,83</b>	2,33	<b>2,17</b>	<b>1,50</b>	<b>1,50</b>	2,50	<b>2,00</b>

Die Kombinationen der besten zwei Sensorsysteme je Standort und Betreiber ergeben sich entsprechend Tabelle 7.

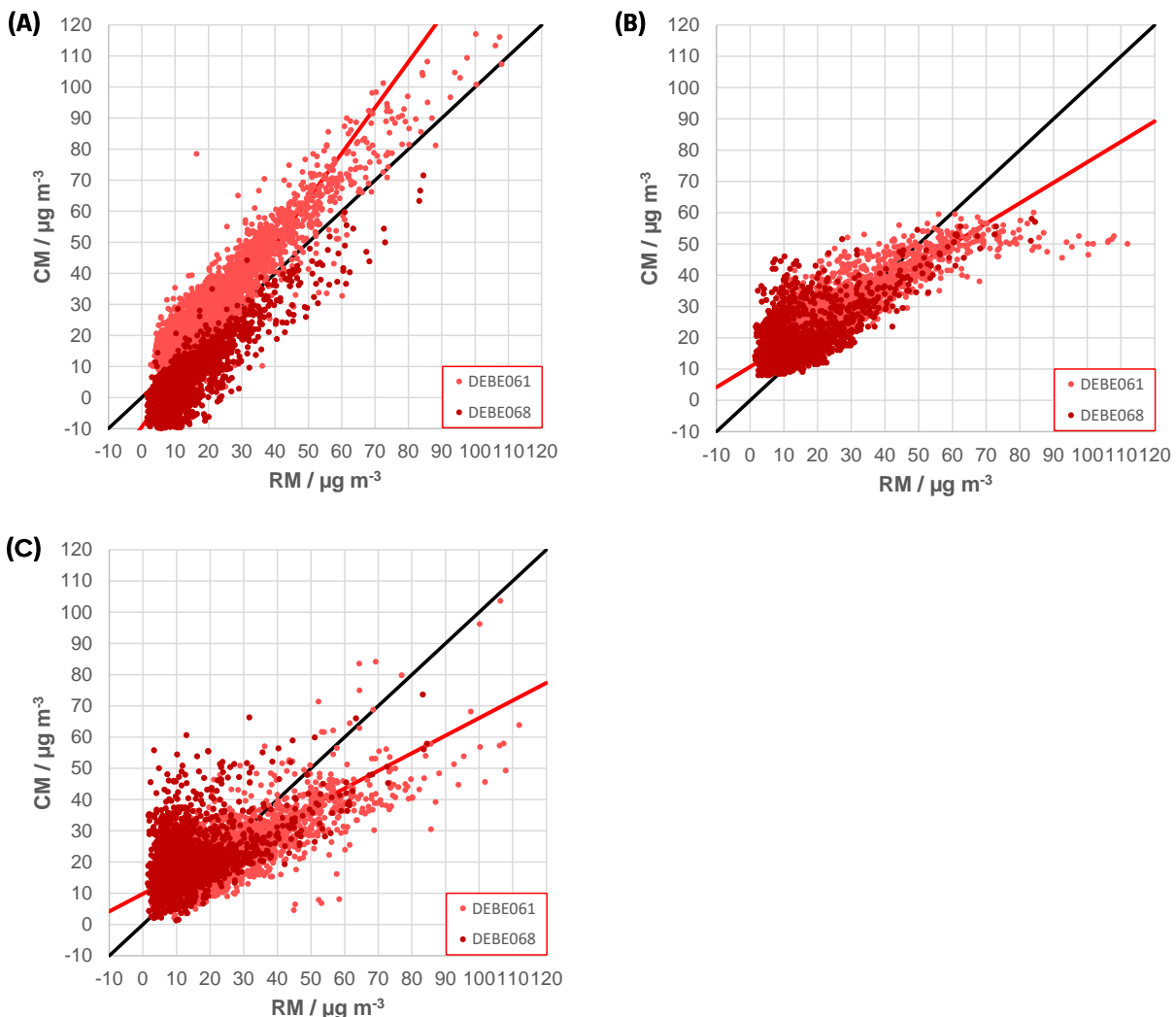
Tabelle 7: Kombination der besten zwei Sensorsysteme zur Bestimmung der Datenqualitätskriterien gem. Tabelle 6.

Station	Bosch	Hawa Dawa	Smart City Factory
MC117	1 und 2	1 und 3 oder 2 und 3	1 und 3
MC171	1 und 3	2 und 3	1 und 3

Für die Sensorsysteme von Hawa Dawa am MC117 führte die durchgeführte Auswertung zu keinem eindeutigen Ergebnis. Für diese Sensorsysteme wurden die Auswertungen mit dem Äquivalenzsheet daher mit zwei Alternativen gerechnet und das bessere Ergebnis, welches die Kombination „2 und 3“ ist, gewertet.

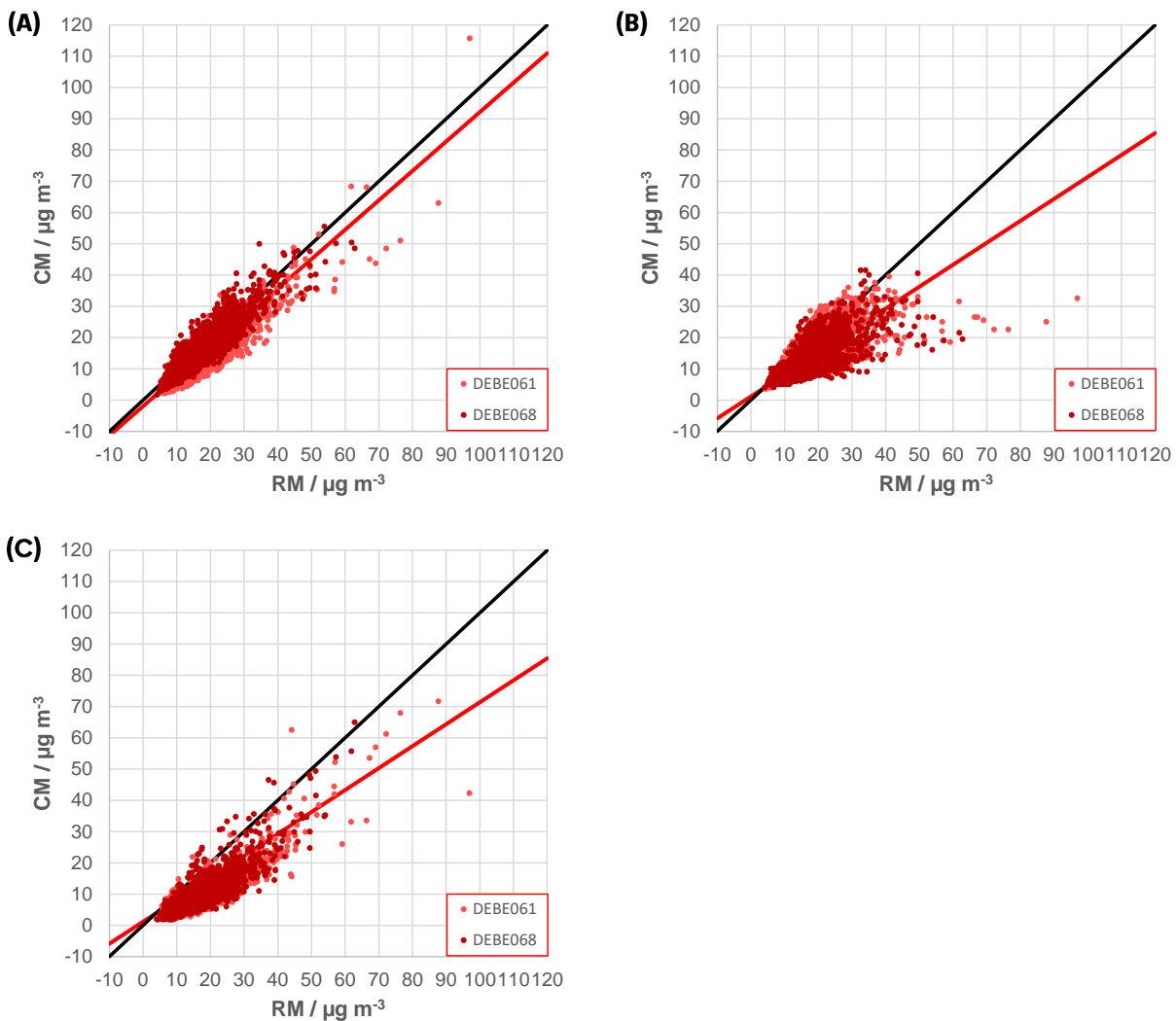
Im Folgenden sind die Streudiagramme der Vergleichsmessungen zwischen den Sensorsystemen und den Referenz- beziehungsweise Äquivalenzverfahren der ersten Projektphase dargestellt.

Abbildung 3 zeigt die Vergleichsmessungen der zwei besten Sensorsysteme an den Standorten DEBE061 und DEBE068 der drei Betreiber für die Komponente  $\text{NO}_2$ . Die Sensorsysteme des Betreibers Bosch zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen dem Signal des Sensors und dem Referenzverfahren, die Varianz der Daten ist jedoch im Vergleich zu den Daten des eingereichten Datensatzes erhöht. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass die Sensorsysteme an den beiden Standorten einen systematischen Versatz aufweisen. Messdaten am Standort DEBE068 sind in den negativen Wertebereich verschoben. Die realisierende orthogonale Regressionsgerade ist damit deutlich steiler als die 1:1-Korrelation und besitzt einen deutlich negativen Achsenabschnitt. Die Sensorsysteme des Betreibers Hawa Dawa zeigen einen nicht linearen Zusammenhang zwischen dem  $\text{NO}_2$ -Signal und der  $\text{NO}_2$ -Konzentration des Referenzverfahrens. Bis  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{NO}_2$  ist der Zusammenhang annähernd linear, flacht dann aber bis  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  stark ab, sodass vom Sensorsystem keine  $\text{NO}_2$ -Stundenmittelwerte von mehr als  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  erfasst wurden. Entsprechend ergeben sich vor allem im höheren Konzentrationsbereich hohe Abweichungen zwischen den Wertepaaren und der orthogonalen Regressionsgeraden. Die Messdaten der Sensorsysteme des Betreibers Smart City Factory wiesen in Bezug auf die Komponente  $\text{NO}_2$  hohe Varianzen auf. Der lineare Zusammenhang zwischen den Signalen der Sensorsysteme und den Daten der Referenzverfahren ist schwach. Allgemein war bei allen Betreibern die Varianz im Bereich der  $\text{NO}_2$ -Konzentration von 0 bis mindestens  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  auf einem unerwartet hohen Niveau und die sich ergebenden Datenqualitätsparameter durchweg geringer als jene, die aus dem eingereichten Datensatz erhoben wurden.



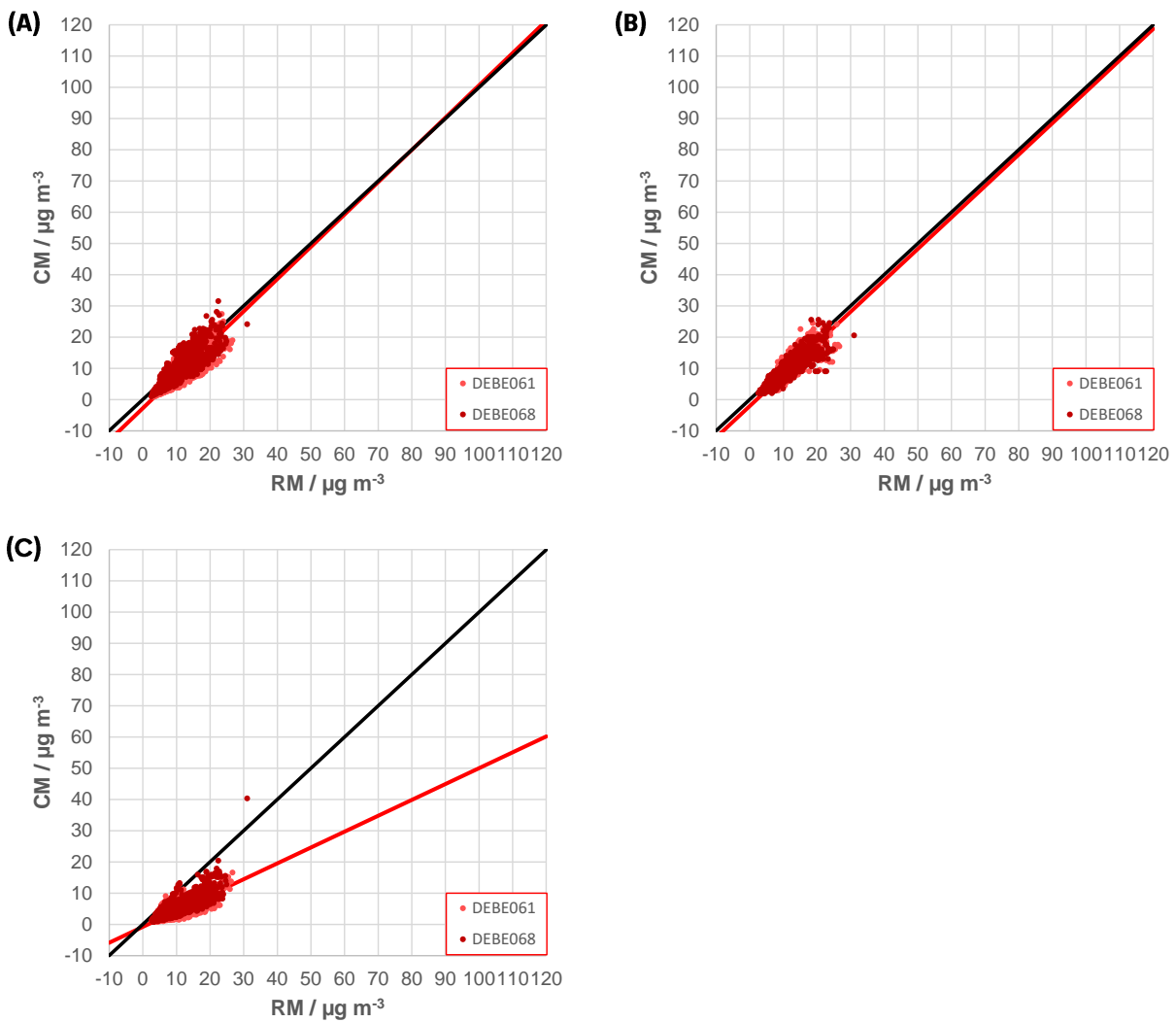
**Abbildung 3: Streudiagramm der  $\text{NO}_2$ -Vergleichsmessungen zwischen den Sensorsystemen (CM) und dem Referenzverfahren von BLUME (RM). (A) Sensorsysteme von Bosch; (B) Sensorsysteme von Hawa Dawa; (C) Sensorsysteme von Smart City Factory. Die schwarze Gerade entspricht der idealen Korrelation von 1:1. Die rote Diagonale stellt die orthogonale Regressionsgerade dar.**

Abbildung 4 zeigt die Vergleichsmessungen der zwei besten Sensorsysteme an den Standorten DEBE061 und DEBE068 der drei Betreiber für die Komponente PM<sub>10</sub>. Allgemein zeigen die Sensorsysteme aller Betreiber einen linearen Zusammenhang zwischen dem Signal des Sensorsystems und der Referenzmessung. Daten im niedrigen Konzentrationsbereich sind sehr gut mit der Referenz vergleichbar, da der Nullpunkt stets gut getroffen wird und – anders als bei der Gassensorik – messtechnisch keine negativen Messwerte möglich sind. Deutliche Unterschiede zeigen sich hinsichtlich der Varianzen zwischen den Wertepaaren sowie der Steigung der Regressionsgeraden, was sich vor allem hinsichtlich der abgeleiteten, erweiterten Messunsicherheit bemerkbar macht. Für Hawa Dawa fällt erneut die starke Unterschätzung bei Werten oberhalb von ca. 50 µg/m<sup>3</sup> auf.



**Abbildung 4: Streudiagramm der PM<sub>10</sub>-Vergleichsmessungen zwischen den Sensorsystemen (CM) und dem Äquivalenzverfahren von BLUME (RM). (A) Sensorsysteme von Bosch; (B) Sensorsysteme von Hawa Dawa; (C) Sensorsysteme von Smart City Factory. Die schwarze Gerade entspricht der idealen Korrelation von 1:1. Die rote Diagonale stellt die orthogonale Regressionsgerade dar.**

In Abbildung 5 sind die Vergleichsmessungen der zwei besten Sensorsysteme an den Standorten DEBE061 und DEBE068 der drei Betreiber für die Komponente PM<sub>2,5</sub> dargestellt. Allgemein sind die Ergebnisse vergleichbar mit der Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Komponente PM<sub>10</sub>, wobei bzgl. der Komponente PM<sub>2,5</sub> die Anstiege der orthogonalen Regressionsgeraden bei Bosch und Hawa Dawa bei 1 liegen. Die Sensorsysteme von Smart City Factory zeigen bzgl. PM<sub>2,5</sub> wie schon bei PM<sub>10</sub> deutliche Minderbefunde.



**Abbildung 5: Streudiagramm der  $\text{PM}_{2,5}$ -Vergleichsmessungen zwischen den Sensorsystemen (CM) und dem Äquivalenzverfahren von BLUME (RM). (A) Sensorsysteme von Bosch; (B) Sensorsysteme von Hawa Dawa; (C) Sensorsysteme von Smart City Factory. Die schwarze Gerade entspricht der idealen Korrelation von 1:1. Die rote Diagonale stellt die orthogonale Regressionsgerade dar.**

Eine Übersicht und einen Vergleich der Datenqualitätsparameter, die aus den Vergleichsmessungen in der ersten Projektphase erhoben wurden, sowie jener, die aus den eingereichten Datensätzen abgeleitet wurden, gibt Tabelle 8.

**Tabelle 8: Vergleich der Datenqualitätsparameter aus den Vergleichsmessungen der ersten Projektphase (BLUME) sowie der eingereichten Datensätze der Betreiber (AN) im Rahmen der Vorauswahl (grün: deutliche Verbesserung gegenüber des eingereichten Datensatzes; rot: deutliche Verschlechterung gegenüber des eingereichten Datensatzes).**

Komponente	Parameter	Bosch		Hawa Dawa		SCF	
		<i>(Datensatz AN ein System ein Standort)</i>	<i>(Datensatz BLUME vier Systeme zwei Standorte)</i>	<i>(Datensatz AN ein System ein Standort)</i>	<i>(Datensatz BLUME vier Systeme zwei Standorte)</i>	<i>(Datensatz AN ein System ein Standort)</i>	<i>(Datensatz BLUME vier Systeme zwei Standorte)</i>
NO <sub>2</sub>	eMU <sup>1)</sup>	24%	69% (+45%)	29%	34% (+5%)	16%	54% (+38%)
	R <sup>2</sup>	0,91	0,79 (-0,12)	0,79	0,69 (-0,10)	0,89	0,45 (-0,44)
PM <sub>10</sub>	eMU <sup>2)</sup>	55%	24% (-31%)	21%	58% (+37%)	33%	71% (+38%)
	R <sup>2</sup>	0,84	0,78 (-0,06)	0,61	0,55 (-0,06)	0,85	0,75 (-0,10)
PM <sub>2,5</sub>	eMU <sup>3)</sup>	26%	18% (-8%)	40%	16% (-24%)	64%	104% (+40%)
	R <sup>2</sup>	0,91	0,79 (-0,12)	0,79	0,85 (+0,06)	0,84	0,64 (-0,20)

<sup>1)</sup> erw. Messunsicherheit bezogen auf 40 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub>

<sup>2)</sup> erw. Messunsicherheit bezogen auf 50 µg/m<sup>3</sup> PM<sub>10</sub>

<sup>3)</sup> erw. Messunsicherheit bezogen auf 30 µg/m<sup>3</sup> PM<sub>2,5</sub>

Allgemein ergaben sich deutliche Unterschiede zwischen den eingereichten Datensätzen und den Ergebnissen der Vergleichsmessungen im BLUME. Bei allen drei Anbietern (Bosch, Hawa Dawa und SCF) traten bei mindestens einem Parameter teils erhebliche Verschlechterungen im Vergleich zu den eingereichten Unterlagen auf.

Bosch erreicht insbesondere bei den Partikelmessungen (PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub>) eine deutliche Reduktion der erweiterten Messunsicherheit (eMU) im Vergleich zu den eingereichten Datensätzen, während die erweiterte Messunsicherheit bei den NO<sub>2</sub>-Messungen im Vergleich deutlich höher ist. Die Bestimmtheitsmaße bleiben bei Bosch auf relativ hohem Niveau, verringern sich aber bei den Messungen im BLUME. Hawa Dawa zeigt bezüglich PM<sub>2,5</sub> eine deutliche Verbesserung der Messunsicherheit und des Bestimmtheitsmaßes, während sich die Datenqualität bei NO<sub>2</sub> und PM<sub>10</sub> beim im BLUME erhobenen Datensatz geringer ausfällt. Bei SCF zeigte sich eine insgesamt deutlich geringere Datenqualität beim im BLUME erhobenen Datensatz, insbesondere bei NO<sub>2</sub> und PM<sub>10</sub>.

### 3.4.2 Bewertung der Betriebskonzepte

Die Bewertung der Betriebskonzepte erfolgte nach den Kategorien Umfänglichkeit und Plausibilität. Gemäß der zur Vergabe der Vorauswahl von Sensorsystemen erstellten Leistungsbeschreibung sollte das Angebot mit dem umfangreichsten Betriebskonzept 45 Punkte und jenes mit der höchsten Praktikabilität 50 Punkte haben. Da die eingereichten Betriebskonzepte bezüglich des Inhalts und der dargestellten Umfänglichkeit sehr unterschiedlich waren sowie die Teilaspekte innerhalb einer Kategorie zwischen den Angeboten unterschiedlich zu bewerten waren, war die Aussage nicht möglich, welches Betriebskonzept hinsichtlich der zwei Kategorien am besten zu bewerten ist.

Um dennoch eine transparente Bewertung zu ermöglichen, erfolgte für die Bewertung der Umfänglichkeit zunächst eine Teilbewertung von Unterkategorien, die sich an den Anforderungen an das Betriebskonzept entsprechend Abschnitt 4.1 der Leistungsbeschreibung orientieren. Entsprechend werden die folgenden fünf Unterkategorien bewertet:

- „Installation und Inbetriebnahme“ mit maximal 5 Punkten,
- „Validierung und Plausibilitätsprüfungen“ mit maximal 10 Punkten,
- „Umsetzung qualitätssichernder Maßnahmen (Instandhaltung/Wartung, Kalibrierung, Justierung)“ mit maximal 20 Punkten und
- „Dokumentation“ mit maximal 10 Punkten

Die Bewertung der Praktikabilität war auf Basis der eingereichten Betriebskonzepte nicht möglich. Alle Angebote werden bezüglich der Praktikabilität des eingereichten Betriebskonzepts mit der vollen Punktzahl bewertet.

Im Folgenden werden die entscheidenden Aspekte der Betriebskonzepte zusammengefasst und die Bewertung der Umfänglichkeit bzgl. der oben genannten Unterkategorien begründet.

#### 3.4.2.1 Bosch

Die Fa. Bosch hat als Betriebskonzept ein siebenseitiges Dokument inklusive der Anlage 1 eingereicht. Im Betriebskonzept wird auf die deutsche Bedienungsanleitung (23 Seiten) sowie eine Foliensammlung zur „Installation und Instandhaltung“ der IMB-Sensorsysteme (12 Seiten) verwiesen.

### Installation und Inbetriebnahme

Zur Installation und Inbetriebnahme der Sensorsysteme wird in Abschnitt 2 des Betriebskonzepts auf die umfangreiche deutsche Bedienungsanleitung des Sensorsystems verwiesen. Die Bedienungsanleitung enthält umfängliche technische Angaben zu den Sensorsystemen, Sicherheitsaspekte beim Umgang mit den Sensorsystemen sowie Informationen zur Installation, Inbetriebnahme und Wartung. Es wird dargestellt, dass die Arbeiten durch einen externen Dienstleister oder durch die Fa. Bosch selbst durchgeführt werden. Dabei wird auf die Foliensammlung „Installation und Instandhaltung“ verwiesen, welche die Erstmontage, die Wartung und die Demontage der Sensorsysteme beleuchtet. Auf die Installation folgt eine Einlaufphase, die im Abschnitt „Validierung / Plausibilitätsprüfungen“ beschrieben wird.

### Validierung/Plausibilitätsprüfungen

Die Validierung und Plausibilitätsprüfung wird in Abschnitt 3 und im Besonderen in Abschnitt 4 des Betriebskonzepts beschrieben. Das beschriebene Vorgehen beinhaltet sowohl einen Ablauf während der sogenannten Einlaufphase als auch eine mehrstufige zyklische Prüfung der Sensorsysteme während des Betriebs.

Die Einlaufphase wird im Allgemeinen bei einer Änderung an der Messstelle (Erstinstallation, Gerätetausch, Stromausfall, ...) durchgeführt. Hierbei wird initial eine Art Selbsttest vom Sensorsystem durchgeführt. Es folgt über einen Zeitraum von bis zu 14 Tagen eine Beobachtungszeit in der die Fa. Bosch die Sensoren des Systems überwacht und ggf. eine Nullpunkt Korrektur vornimmt. Erst nach Abschluss der Einlaufphase - nachdem beispielsweise die Basislinie der Sensorsysteme justiert wurde - erfolgt eine schriftliche Freigabe des jeweiligen Sensorsystems und somit die Übertragung gültiger Messwerte durch die Fa. Bosch.

Im Routinebetrieb führt jedes Sensorsystem eine kontinuierliche Selbstdiagnose durch, bei der Statusparameter der Peripherie (Lüfterdrehzahl, Temperaturregelung, Heizungsfunktion) sowie Signalraten der Sensorelemente automatisiert überwacht werden. Im Falle eines festgestellten Fehlers wird ein Servicefall ausgelöst, der von einem Mitarbeiter der Fa. Bosch entweder aus der Ferne oder bei einem vor-Ort-Termin bearbeitet wird.

Ferner werden die erfassten Messdaten täglich einer halbautomatischen Plausibilitätsprüfung durch einen Mitarbeiter der Fa. Bosch unterzogen. Auch wenn sich der Umfang dieser halbautomatischen Prüfung aus dem Betriebskonzept nicht herauslesen lässt, entspricht dieses Vorgehen im Allgemeinen dem der Messnetzroutine im BLUME und ist positiv zu bewerten. Weiterhin werden zyklisch (die Frequenz wird nicht genannt) Plausibilitätsprüfungen und Parameterkorrekturen durchgeführt, die auf menschlicher Erfahrung und Fachwissen basieren. Auf die Maßnahmen wird explizit im nächsten Abschnitt eingegangen.

### Umsetzung qualitätssichernder Maßnahmen (Instandhaltung/Wartung, Kalibrierung, Justierung)

Der vorgesehene Umfang und die Umsetzung qualitätssichernder Maßnahmen werden im Abschnitt 5 und zum Teil in Abschnitt 4 des Betriebskonzepts erläutert.

Wartungen werden jährlich durch einen geschulten Servicedienstleister oder die Fa. Bosch selbst durchgeführt. Bei der Wartung wird das Sensorsystem gereinigt, die Sensorelemente ausgetauscht werden und es erfolgt eine Funktionsüberprüfung. Vor der Wartung ist vorgesehen, dass das Sensorsystem an eine Messstation desselben Belastungsregimes umgesetzt wird, um eine Kalibrierung des Sensorsystems vorzunehmen und die rückwärtigen Messdaten auf Plausibilität zu prüfen (Vergleichsmessung mit Referenzverfahren). Nach Abschluss der Wartung folgt eine Einlaufphase. In der Einlaufphase der Gassensoren erfolgt ggf. eine Nullpunktjustierung, basierend auf den in Anhang 1 dargestellten Vergleichsmessungen mit Referenzverfahren, bei der die Vergleichsmessungen zur Beurteilung des Erfolgs der Signalkorrektur verwendet werden. Die Freigabe der Sensoren erfolgt durch die Fa. Bosch schriftlich.

Die Sensorik wird von der Fa. Bosch werksseitig kalibriert. Sollten vor allem bzgl. der Partikelcharakteristik am Aufstellort Abweichungen zu erwarten sein, ist eine Vergleichsmessung mit einer Referenzstation vergleichbarer Partikelcharakteristik vorgesehen. Basierend auf dieser Vergleichsmessung kann eine Justierung des Partikelsensors erfolgen. Eine Justierung der Empfindlichkeit der Gassensorik ist nicht vorgesehen.

### Dokumentation

Messdaten werden mit den Kennzeichnungen „vorläufig“, „gültig“ und „ungültig“ gekennzeichnet und werden bzgl. der Gassensorik nicht nachträglich angepasst. Eine Anpassung kann im Einzelfall für die Partikelsensorik auf Basis der Rückmessung mit der Referenzstation erfolgen (Ortsfaktor). Auf Wunsch stellt die Fa. Bosch einen zusätzlichen Datensatz mit aktualisiertem Auswertalgorithmus zur Verfügung.

Der Freigabeprozess erfolgt durch die Fa. Bosch stets schriftlich. Nach der Wartung der Sensorsysteme werden die Arbeiten in einem Wartungsbericht dokumentiert.

Ferner existieren eine Bedienungsanleitung des Sensorsystems sowie eine Dokumentation der Datenschnittstelle, welche die Fa. Bosch zur Verfügung stellt.

### 3.4.2.2 Hawa Dawa

Die Fa. Hawa Dawa hat als Betriebskonzept ein zwölfseitiges Dokument eingereicht. Im Betriebskonzept wird auf das deutsche Benutzerhandbuch zum Sentience Luftqualitätssensorsystem (25 Seiten) verwiesen, das jedoch nicht mit der Einreichung des Betriebskonzepts übermittelt, sondern über einen Internet-Link bereitgestellt wurde. Das Benutzerhandbuch konnte darüber jedoch nicht direkt heruntergeladen werden, sondern musste durch Angabe personenbezogener Daten angefordert werden und wurde folglich per E-Mail zugestellt.

#### Installation und Inbetriebnahme

Die Installation und Inbetriebnahme wird in Abschnitt 3.1 und 3.2 des Betriebskonzepts erläutert. Dabei wird auf das Benutzerhandbuch des Sensorsystems verwiesen. Das Benutzerhandbuch enthält umfangreiche technische Angaben zu den Sensorsystemen sowie Informationen zur Installation, Inbetriebnahme und Wartung. Es wird ersichtlich, dass Hawa Dawa die Installation der Sensorsysteme auch dem Kunden überlässt. Hierfür sind in der Anleitung die Schritte zur Anmeldung des Sensorsystems ins Netzwerk von Hawa Dawa beschrieben. Im Betriebskonzept wird aber gesondert darauf verwiesen, dass die Installation entweder durch Hawa Dawa oder einen Mitarbeiter von BLUME erfolgen kann. Auf die Installation folgt eine Einlaufphase, die im Abschnitt Validierung/Plausibilitätsprüfungen beschrieben wird. Negativ ist zu bewerten, dass das Benutzerhandbuch, das Bestandteil des Betriebskonzepts sein soll, nicht mitgeliefert wurde bzw. nicht ohne Angaben personenbezogener Daten heruntergeladen werden konnte.

#### Validierung/Plausibilitätsprüfungen

Die Validierung und Plausibilitätsprüfungen sind auf mehrere Abschnitte des Betriebskonzepts verteilt. Die regelmäßige Plausibilitätsprüfung erfolgt über automatische Meldungen, die über das in Abschnitt 2.2 dargestellte "interne Maintenance Tool" von einem Mitarbeiter von Hawa Dawa bearbeitet werden. Die automatischen Meldungen werden aus Sensorstatusmeldungen, aber auch aus den Rohdaten der Sensorsysteme generiert. Hawa Dawa teilte mit, in Rücksprache mit BLUME weitere geeignete Kenngrößen zur Plausibilitätsprüfung integrieren zu können.

Für Plausibilitätsprüfungen sind gemäß Abschnitt 2.3 Vergleichsmessungen mit Referenzverfahren vorgesehen (siehe folgender Abschnitt).

#### Umsetzung qualitätssichernder Maßnahmen (Instandhaltung/Wartung, Kalibrierung, Justierung)

Die vorgesehenen qualitätssichernden Maßnahmen und deren Umsetzung sind auf mehrere Abschnitte im Betriebskonzept verteilt. Allgemein erläutert Hawa Dawa ihr Hybridnetz-System mit einem dynamischen Kalibriermodell im Abschnitt 1. Dieses Netz besteht aus Reference-Nodes (Messstationen des BLUME), Master-Nodes (Sensorsystemen an Messstationen des BLUME) und frei im Untersuchungsgebiet aufstellbaren Field-Nodes. Mithilfe der Reference- und Master-Nodes werden Trainingsdaten für das dynamische Kalibriermodell erzeugt, das (Vorschlag von Hawa Dawa) wöchentlich auf die Field-Nodes übertragen wird. Die Regeln zur Erstellung des Kalibriermodells bleiben immer gleich.

In Abschnitt 2 beschreibt Hawa Dawa den Messnetzbetrieb und die laufende Qualitätssicherung. Die Kalibrierung der Sensorsysteme erfolgt zweistufig. Die Sensorsysteme werden vor dem Feldeinsatz initial kalibriert (Werkskalibrierung) und anschließend fortlaufend mit einem dynamischen Kalibriermodell. Die fortlaufende Kalibrierung erfolgt nach dem Muster:

- in-Field Plausibilitätsprüfung der Vorkalibrierungsdaten,
- Aggregation auf Zeitscheiben,
- Kontinuierliche Kalibrierung mit einem maschinellen Lernmodell (ML), das von Master Nodes übertragen wird,
- Regelmäßige Aktualisierung des ML basierend auf den Daten der Reference- und Master-Nodes und
- Nachkalibrierungsprüfungen.

Als Vergleichsmessungen mit Referenzverfahren schlägt Hawa Dawa Messungen an den Containern MC190, MC042 und MC018 - an sogenannten Plausibilisierungsstandorten - vor. Die so erhobenen Messdaten liefern Daten, die unabhängig von den Reference- und Master-Nodes sind und sollen somit das ML auf Overfitting-Effekte prüfen.

Regelmäßige Wartungen sind nicht vorgesehen. Wartungen werden jedoch durchgeführt, wenn ein Hardwaredefekt vorliegt oder eine Plausibilitätsprüfung, basierend auf „Netzwerk-Algorithmen“, zeigt, dass die Sensordrift nicht mehr durch eine Kalibrierung beheben lässt. Der Austausch von Sensorsystemen ist für den Kunden kostenneutral.

#### Dokumentation

Die Dokumentation, welche in eine Anwenderdokumentation und eine systeminterne Datendokumentation untergliedert wird, ist in Abschnitt 2.5 des Betriebskonzepts erläutert.

Die Anwenderdokumentation sieht die folgenden Komponenten vor:

- Benutzerhandbuch,
- Online Dokumentation für Hawa-Dawa-Dashboards und
- Dokumentation der Entwicklerschnittstelle zur Einbettung der Hawa Dawa API in die Softwareanwendungen des Kunden.

Die systeminterne Datendokumentation und die Archivierung sollen nachvollziehbar machen, aus welchen Rohdaten welche kalibrierten Daten generiert wurden, und somit Rekonstruktionen und Revisionen ermöglichen. Alle Rohwerte und Zwischenergebnisse bis hin zum qualitätsgesicherten Messwert werden gespeichert und archiviert.

### 3.4.2.3 Smart City Factory

Die Fa. Smart City Factory hat als Betriebskonzept ein 39-seitiges Dokument inklusive einem Anhang, bestehend aus dem Datenblatt des verwendeten Sensorsystems der Fa. Vaisala, Zertifikaten des QM-Systems der Fa. Vaisala, einem Datenblatt des verwendeten Edge-Computers sowie der verwendeten Stromversorgung eingereicht.

#### Installation und Inbetriebnahme

Die Installation und Inbetriebnahme wird in Abschnitt 5 des Betriebskonzepts explizit in Bezug auf die durchgeführten Tätigkeiten am MC117 und MC171 während der Phase 1 des Projekts erläutert. Es werden alle zu installierenden Komponenten beschrieben, auf das Montagesystem der Fa. Vaisala verwiesen und die Installationsdauer beziffert. Ferner wird der Datenfluss zur Bereitstellung der Messdaten erläutert.

#### Validierung/Plausibilitätsprüfungen

Die Validierung und Plausibilitätsprüfung wird in Abschnitt 4 des Betriebskonzepts adressiert. Entsprechend den Schilderungen erfolgt eine Kompensation der Alterung aller Sensorelemente durch „intelligente Algorithmen“. Die elektrochemischen Gassensoren besitzen eine Funktionalität, die den Zustand der Sensorelemente bewerten können soll. Diese Funktionalität ist aber nicht näher erläutert. Wenn der Zustand unter 30 % sinkt, empfiehlt Vaisala einen Austausch. Was dies für den Betrieb des Sensorsystems von Smart City Factory bedeutet – ob das Sensorelement dann durch Smart City Factory auch getauscht wird – ist unbekannt. Die Überwachung der Zelltemperatur setzt bei Überschreitung einer kritischen Temperatur die Messwerte ungültig. Ferner wird eine Parallelmessung der Luftfeuchte aufgeführt, die zur Validierung der Partikelmessungen herangezogen wird und ggf. Messwerte ungültig setzt. Nach Inbetriebnahme der Messgeräte wird eine Warmlaufphase von 24 Stunden ausgelöst. Es wird nicht erwähnt, ob innerhalb oder nach dieser Zeit eine Kalibrierung oder Justierung der Sensorsysteme vorgesehen ist.

#### Umsetzung qualitätssichernder Maßnahmen (Instandhaltung/Wartung, Kalibrierung, Justierung)

Die Sensorsysteme werden werksseitig von der Fa. Vaisala (akkreditiertes Prüflabor) kalibriert. Bezüglich der Wartung der Sensorsysteme werden in Abschnitt 6.1 Wechselintervalle der Komponenten genannt. Es wird aber hier lediglich von herstellerseitigen Empfehlungen oder der Möglichkeit gesprochen, die Sensorsysteme beim Hersteller einzuschicken. Unter Berücksichtigung der Sätze:

„In Bezug auf die Komponenten von Smart City Factory besteht kein Wartungsbedarf. Das gelieferte System ist für einen Zeitraum von 10 Jahren ausgelegt.“

ist unklar, welche Arbeiten an den Sensorsystemen Smart City Factory selbst vorsieht.

#### Dokumentation

Dokumentationstätigkeiten klingen im Abschnitt 2 des Betriebskonzepts zum Qualitätsmanagement an. Der Umfang und die Art der Dokumentation bleiben jedoch unklar.

Erwartete Punkte bei der Dokumentation wie:

- eine Messstellendokumentation,
- die Kennzeichnung von Kalibrierungen und ggf. Justierungen im Datensatz,
- die Erstellung von Wartungsprotokollen oder
- eine Versionskontrolle der Auswertalgorithmen

wurden nicht beschrieben.

### 3.4.2.4 Zusammenfassung und Punktevergabe

In Tabelle 9 ist die Punktevergabe bei der Bewertung der Betriebskonzepte dargelegt und fasst die Vor- und Nachteile der Sensorsysteme im Hinblick auf den geplanten Betrieb der Geräte zusammen.

**Tabelle 9: Punktevergabe bei der Bewertung der Betriebskonzepte (mit „+“ sind positive und mit „-“ sind negative Aspekte des Betriebskonzepts gekennzeichnet, die Punktezahl ergibt sich aus der im Text dargestellten Einschätzung)**

	Bosch		Hawa Dawa		Smart City Factory	
Installation/Inbetriebnahme (5 Punkte)	+ vollständig	5 Punkte	+ vollständig - erschwerter Zugang zum Handbuch	4 Punkte	+ vollständig	5 Punkte
Validierung und Plausibilitätsprüfung (10 Punkte)	+ Einlaufphase mit Abläufen für Gas- und Partikelsensoren + Selbstdiagnose anhand von Statusparametern + tägliche halbautomatische Plausibilitätskontrolle + zyklische Plausibilitätsprüfung mit Parameterkorrekturen - unklar sind die Parameter, die Plausibilitätsprüfung zugrunde liegen - Häufigkeit der zyklischen Plausibilitätsprüfung	8 Pkt.	+ automatische Plausibilitätskontrolle anhand von Systemstatusparametern u. Rohdaten => internes Wartungstool + drei Plausibilitätsstandorte an BLUME-Stationen - Umfang und Inhalt der Validierung sind intransparent dargestellt	7 Pkt.	+ Einlaufphase + automatische Statuskontrollen - Konzept sieht keine weitere laufende Datenvalidierung im Messnetzbetrieb vor	3 Pkt.
Umsetzung qualitätssichernder Maßnahmen (20 Punkte)	+ Werkskalibrierung + Nullpunktjustierung in Einlaufphase + jährliche Wartung mit Reinigung, Austausch + Vergleichsmessungen mit Referenzverfahren vor und nach Wartung - Im Vergleich zu den Referenzverfahren erscheint eine jährliche Wartung bei einfacheren Sensor-Messsystemen als zu gering - Prüfung der Leistungsfähigkeit im Messnetzbetrieb zwischen den Wartungen ist unzureichend	15 Pkt.	+ Werkskalibrierung + innovative dynamische Netzwerkkalibrierung (Prüfung durch TÜV) + Vergleichsmessungen mit Referenzverfahren an Plausibilitätsstandorten + Reparaturen im automatisch festgestellten Fehlerfall - Field-Nodes werden nie direkt mit dem Referenzverfahren abgeglichen. Annahme: Field-Nodes verhalten sich analog zu den Master-Nodes oder Plausibilisierungsstandorten - Abschneiden der Maxima bei der Vergleichsmessung in der Parcussstraße nicht erklärt - Keine turnusmäßige Wartung der Sensorsysteme	14 Pkt.	+ Werkskalibrierung + vergangene Vergleichsmessungen + Empfehlungen für Wartungsintervalle - Kein direktes Konzept zur laufenden Qualitätssicherung im Messnetzbetrieb	5 Pkt.
Dokumentation (10 Punkte)	+ Bedienungsanleitung + Schnittstellenbeschreibung + Status-Flags an Messdaten + Wartungsberichte + schriftlicher Sensor-Freigabeprozess + INERIS-Zertifizierung - Umfang der Datendokumentation unklar	8 Pkt.	+ Bedienungsanleitung + Schnittstellenbeschreibung + Umfangreiche systeminterne Datendokumentation + Dashboard-Doku + TÜV-Report - Wartungsberichte fehlen	9 Pkt.	+ ISO 9001-Doku + Datenblätter - Bedienungsanleitung - Schnittstellenbeschreibung - Umfang der Datendokumentation unklar - Wartungsberichte fehlen - keine externe Zertifizierung des Sensorsystems	5 Pkt.

### 3.4.3 Bewertung der Sensorsysteme und Auswahl eines Sensorsystems

Ausgehend von den in den Abschnitten 3.4.1 und 3.4.2 dargestellten Ergebnissen ergab entsprechend der in Tabelle 10 aufgeführten Bewertungsmatrix, dass die Firma Bosch mit 160 von 200 möglichen Punkten die höchste Punktzahl erreichte. Die Firma Hawa Dawa erreichte mit 139 von 200 Punkten den zweiten und Smart City Factory den dritten Platz mit 68 von 200 Punkten.

**Tabelle 10: Bewertungsmatrix zur Auswahl eines Auftragnehmers für die Messungen im Berliner Luftgütemessnetz während der Projektphasen zwei und drei (es wurde keine lineare Korrektur der Messdaten vorgenommen)**

Kategorie	Parameter	Punktzahl		Bezugswert		Kenngröße			Punktzahl (PZ)		
		max	min	max. PZ	min. PZ	Bosch	HD	SCF	Bosch	HD	SCF
NO <sub>2</sub>	erw. Messunsicherheit	20	0	34%	35%	69,3%	33,5%	54,2%	0	20	0
	Bestimmtheitsmaß	15	0	0,789	0,75	0,789	0,689	0,453	15	0	0
PM <sub>2,5</sub>	erw. Messunsicherheit	20	0	16%	35%	17,8%	16,2%	103,9%	18	20	0
	Bestimmtheitsmaß	15	0	0,849	0,75	0,788	0,849	0,639	6	15	0
PM <sub>10</sub>	erw. Messunsicherheit	20	0	24%	35%	24,2%	57,5%	71,0%	20	0	0
	Bestimmtheitsmaß	15	0	0,782	0,75	0,782	0,549	0,747	15	0	0
Betriebs- konzept	Umfänglichkeit	45	0			36	34	18	36	34	18
	- Installation, Inbetriebnahme (5 Pkt.)					5	4	5			
	- Betrieb / Qualitätssicherung (40 Pkt.)					31	30	13			
	-> Validierung/Plausibilitätsprüfung (10 Pkt.)					8	7	3			
	-> qualitätssichernde Maßnahmen: (20 Pkt.) Wartung, Vgl.-Messung, Kalibrierung					15	14	5			
	-> Dokumentation (10 Pkt.)					8	9	5			
Praktikabilität	50	0			50	50	50	50	50	50	
<b>Summe:</b>		<b>200</b>	<b>0</b>						<b>160</b>	<b>139</b>	<b>68</b>

#### Abkürzungen

Bosch	Robert Bosch GmbH
HD	Hawa Dawa GmbH
SCF	Smart City Factory GmbH

Trotz der teilweise hohen Punktzahlen lagen die Ergebnisse vor allem bezüglich der Datenqualität für die Parameter NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub> deutlich unter den Erwartungen, die auf den eingereichten Datensätzen des Vorauswahlprozesses entsprechend Abschnitt 3.2 basierten. So zeigte sich sowohl eine erheblich schlechtere Messunsicherheit (z. B. 71 % statt 33 % bei Fa. Smart City Factory bei PM<sub>2,5</sub>) und zum Teil ein erheblich schlechteres Bestimmtheitsmaß (z. B. 0,45 statt 0,89 bei Fa. Bosch bei NO<sub>2</sub>).

Zur Diskussion der Ergebnisse wurden mit den Anbietern Rücksprachen gehalten, aus denen sich Gründe der teilweise mangelnden Datenqualität und Optimierungsmaßnahmen ableiten ließen. Eine Zusammenfassung dieser Gespräche beinhaltet Tabelle 11.

**Tabelle 11: Zusammenfassung der Rücksprachen mit den Anbietern nach den Messungen in der ersten Projektphase**

Bosch	Hawa Dawa	Smart City Factory
NO <sub>2</sub> : Nullpunktabgleich (gemäß dem Betriebskonzept) konnte aufgrund mangelhafter Datenverbindung in der Kalibrierphase vor den Messungen nicht durchgeführt werden.	Defizite der Datenqualität sind bedingt durch die geforderte statische Parametrisierung der Sensorsysteme (angewandte Parametrisierung von DEBY037 - München/Stachus).	Abweichungen sind durch die Umgebungsbedingungen bedingt. Algorithmus war auf niedrige Temperaturen und höhere Konzentrationen optimiert.
Nullpunktabgleich ist im Messnetzbetrieb durchführbar und verbessert die Homogenität.	Im durch Hawa Dawa vorgesehene Betrieb mit dynamisch angepasster Parametrisierung wird eine höhere Datenqualität erreicht.	Neuer Algorithmus, der auf physikalischer Modellierung basiert, und neues Partikelsensormodul sind verfügbar.

Trotz der Mängel bezüglich der Datenqualität wurde die zweite Projektphase mit der Firma Bosch weitergeführt, da sie anhand der festgelegten Auswahlmatrix, der Anbieter mit den formal besten Kennwerten war und die Firma glaubhaft Verbesserungspotentiale für die Messungen in der zweiten Projektphase aufzeigen konnte.

Den Firmen Hawa Dawa und Smart City Factory wurde angeboten, zwei der bisher installierten Sensorsysteme bis zum 01.07.2023 kostenneutral weiterzubetreiben und nach eigenem Ermessen - beispielsweise durch den Austausch von Sensormodulen oder der Änderung des Algorithmus zur Datenauswertung - Optimierungen durchzuführen. Dieses Angebot wurde von beiden Firmen wahrgenommen. Die Messungen dieser Sensorsysteme waren zwar nicht mehr direkter Bestandteil des Projekts, sollten aber als Vergleichsmaßstab zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der ausgewählten Sensorsysteme dienen. Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen sind in Abschnitt 4.3 aufgeführt.

# 4 PROJEKTPHASE 2: HERSTELLUNG DER VORAUSSETZUNGEN FÜR DIE INTEGRATION IN DAS LUFTGÜTEMESSNETZ

In der zweiten Projektphase sollten die Voraussetzungen für die Integration der Sensorsysteme der Firma Bosch in das Luftgütemessnetz geschaffen werden. Dazu wurden in drei parallel ablaufenden Abschnitten:

1. weitere Vergleichsmessungen durchgeführt, um die Langzeitstabilität und Standortspezifität der Sensorsysteme zu untersuchen,
2. das erarbeitete Betriebskonzept des Sensorsystems während der Vergleichsmessungen angewendet, auf Vollständigkeit und Praktikabilität überprüft und gegebenenfalls an die gegebenen Anforderungen und Eigenschaften des Sensorsystems angepasst und
3. die Datenflüsse aus Phase 1 so erweitert werden, dass die vom Anbieter durchzuführenden Datenvalidierungen sowie Änderungen am Sensorsystem wie beispielsweise Gerätetausch, Justierungen nach erfolgter Kalibrierung oder Änderungen am Auswertalgorithmus (z. B. durch Versionierung) durch Einträge in die Datenbank des Berliner Luftgütemessnetzes transparent nachvollzogen werden können.

## 4.1 Prüfung der Standortspezifität und Langzeitstabilität

Zur Prüfung der Langzeitstabilität der Sensorsysteme wurden die Messungen an den Standorten aus der ersten Projektphase mit jeweils zwei Sensorsystemen pro Standort fortgeführt. Die Messungen sollten solange anhalten, bis eine Stabilität und Homogenität der Geräte untereinander nachweisbar waren, mindestens jedoch vier Monate. Zur Erweiterung der Untersuchung der Standortspezifität wurden am 16.12.2022 jeweils ein Sensorsystem an die Sondermessstation MC014 im Lerschpfad (nur Referenzmessung für Stickoxide, siehe Abbildung 6) nahe einer Autobahnauffahrt und an die Messstation MC077 Buch am Stadtrand (siehe Abbildung 7) installiert. Somit wurden Messungen unter vier verschiedenen Belastungssituationen durchgeführt. Da die Sondermessstation MC014 eingestellt wurde, erfolgte am 04.05.2023 die Umsetzung des Sensorsystems zur Messstation MC077 in Buch, sodass dort ebenfalls eine Parallelmessung erfolgte.



Abbildung 6: Messung mit einem Sensorsystem an der Sondermessstation MC014 zur Erfassung der Luftschadstoffbelastung in der Nähe der A100 im Bezirk Charlottenburg-Wilmersdorf.



**Abbildung 7: Sensorsystem an der Messstation MC077 Buch am Stadtrand zur Prüfung des Messsystems bei geringer Stickstoffdioxid- und Partikelkonzentration.**

Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen bezüglich der Komponenten  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  und  $\text{PM}_{2,5}$  während der zweiten Projektphase sind in den Abschnitten 4.1.1 bis 4.1.3 aufgeführt. Es wurden alle vom Sensorsystem als gültig deklarierte Daten im Zeitintervall vom 30.11.2022 12:00 bis zum Ende der Messungen am 19.06.2024 ausgewertet. Zur Bewertung der Vergleichbarkeit der Messergebnisse unter verschiedenen Umgebungsbedingungen sowie der Homogenität zweier parallel betriebener Messgeräte am selben Standort wurden analog zur Auswertung in Phase 1 die Datenqualitätsparameter bestimmt und in Tabelle 12 gelistet.

**Tabelle 12: Vergleich der aus den Vergleichsmessungen der zweiten Projektphase abgeleiteten Datenqualitätsparameter Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) und erweiterte Messunsicherheit (eMU, bezogen auf  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$ ,  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{10}$  bzw.  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{2,5}$ ).**

Regime	Container	Nr.	$\text{NO}_2$		$\text{PM}_{10}$		$\text{PM}_{2,5}$	
			$R^2$	eMU	$R^2$	eMU	$R^2$	eMU
Stadtrand	MC077	1	0,19	122,3%	0,65	87,3%	0,81	20,6%
		2	0,08	1338,3%	0,16	69,4%	0,33	122,9%
Hintergrund	MC171	1	0,85	44,1%	0,72	56,9%	0,83	78,9%
		2	0,09	67,4%	0,43	99,0%	0,86	59,1%
Verkehr	MC117	1	0,74	72,5%	0,67	65,9%	0,82	79,5%
		2	0,69	78,5%	0,88	39,4%	0,88	61,2%
Sondermessstation	MC014	1	0,84	33,9%	---	---	---	---

#### 4.1.1 Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>)

Die Vergleichsmessungen der NO<sub>2</sub>-Konzentrationen zeigen ein sehr heterogenes Bild hinsichtlich der Datenqualität der verwendeten Sensorsysteme. So variieren die Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ) je nach Standort und Sensor stark und liegen zwischen 0,08 und 0,85. Besonders deutlich wird dies an der Station MC171. Aus den Vergleichsmessungen ergeben sich für zwei baugleiche Sensorsysteme Bestimmtheitsmaße von 0,85 bzw. 0,09, ein erheblicher Unterschied, der auf mangelnde Homogenität der Sensorsysteme hinweist.

Die erweiterten Messunsicherheiten (bezogen auf 40 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub>) liegen zwischen 34 % (an der Station MC014) und über 1300 % (an der Station MC077). Dies verdeutlicht, dass sowohl systematische Abweichungen zum Referenzverfahren als auch individuelle Abweichungen zwischen den Sensorsystemen bestehen. Die in Abbildung 8 dargestellten Streudiagramme der NO<sub>2</sub>-Vergleichsmessungen veranschaulichen dies durch stark voneinander abweichende orthogonale Regressionsgeraden. Eine einheitliche lineare Korrektur auf Basis der orthogonalen Regression ist somit nicht möglich. Vielmehr müsste für jedes Sensorsystem eine individuelle Korrektur vorgenommen werden, was den Einsatz solcher Systeme in einem Messnetz erheblich erschwert.

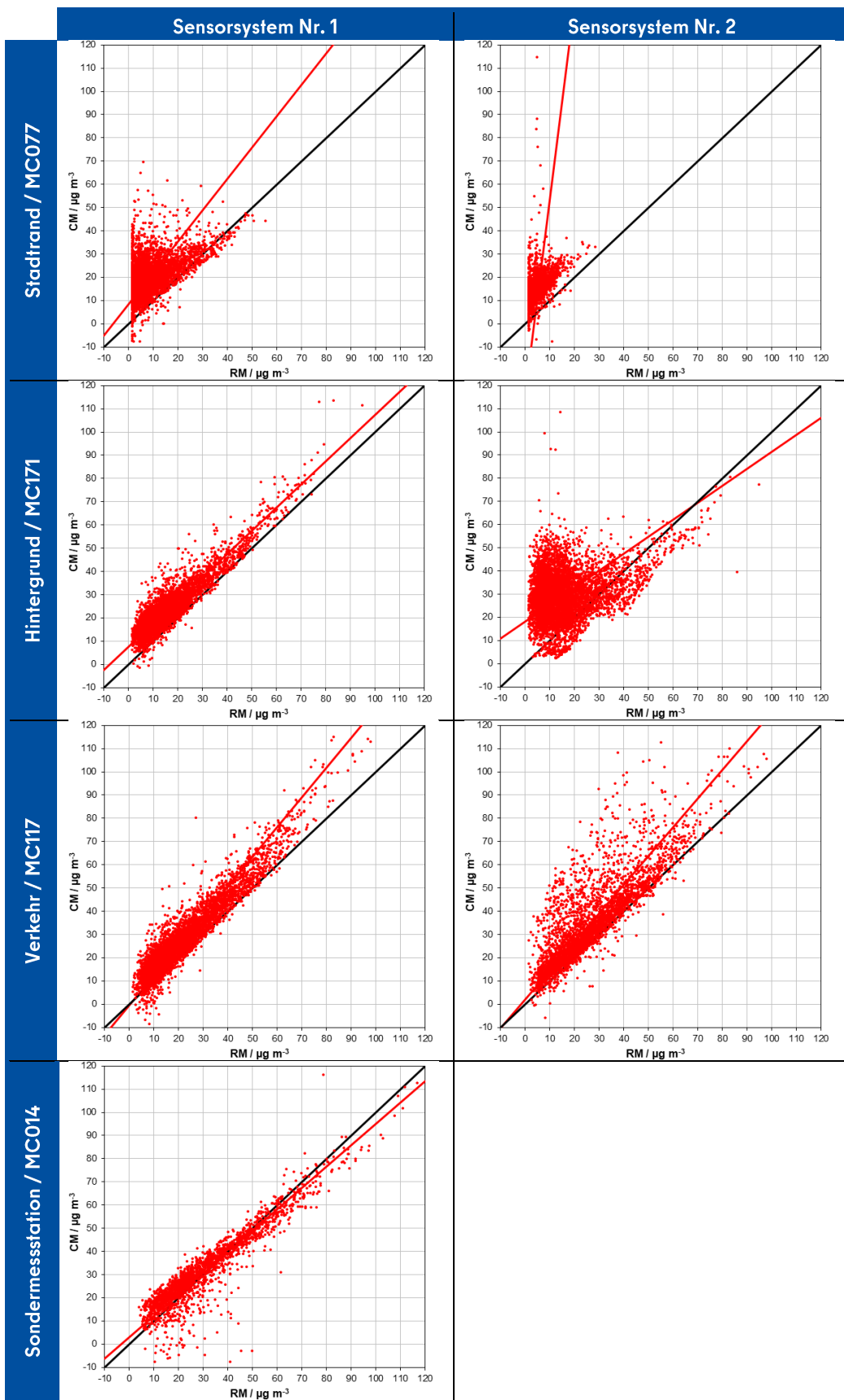


Abbildung 8: Streudiagramme der NO<sub>2</sub>-Vergleichsmessungen der Sensorsysteme des Betreibers Bosch (CM) und der Referenzverfahren von BLUME (RM) während der zweiten Projektphase. Die schwarze Gerade entspricht der idealen Korrelation von 1:1. Die rote Diagonale stellt die orthogonale Regressionsgerade dar.

#### 4.1.2 Partikel PM<sub>10</sub>

Auch bezüglich der Komponente PM<sub>10</sub> zeigen die Datenqualitätsparameter der Sensorsysteme eine erhebliche Spannweite. Die Bestimmtheitsmaße reichen von 0,16 (MC077, Sensor 2) bis zu 0,88 (MC117, Sensor 2), die erweiterten Messunsicherheiten (bezogen auf 50 µg/m<sup>3</sup> PM<sub>10</sub>) liegen zwischen 39 % und 99 %. Wie in Abbildung 9 zu erkennen ist, weichen die orthogonalen Regressionsgeraden der PM<sub>10</sub>-Vergleichsmessungen teils erheblich von der idealen 1:1-Korrelation ab. Die Messungen von PM<sub>10</sub> bestätigen damit das Bild der NO<sub>2</sub>-Messungen. In einzelnen Fällen (Messungen an MC117) erscheinen die Sensorsysteme zwar durchaus in der Lage, PM<sub>10</sub> mit akzeptabler Qualität zu messen, jedoch ist auch hier keine durchgängig konsistente Leistungsfähigkeit über alle Messstationen feststellbar. Die Sensorsysteme weisen beispielsweise an MC077 erhebliche Unterschiede untereinander auf, sodass eine Bewertung des Einflusses von Umweltbedingungen, Standorteinflüssen und gegebenenfalls Alterungserscheinungen nicht sinnvoll möglich ist.

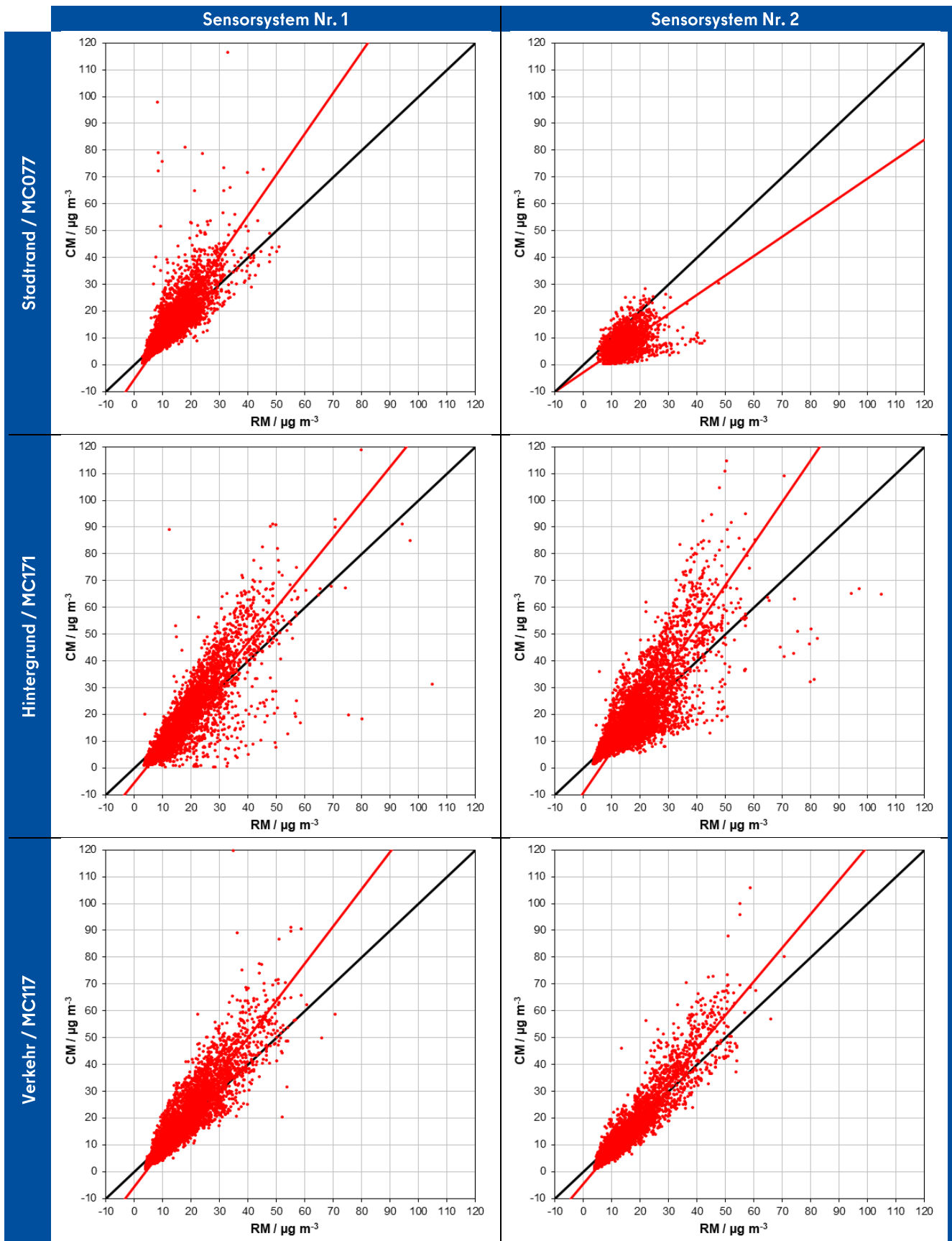


Abbildung 9: Streudiagramme der PM<sub>10</sub>-Vergleichsmessungen der Sensorsysteme des Betreibers Bosch (CM) und der Referenzverfahren von BLUME (RM) während der zweiten Projektphase. Die schwarze Gerade entspricht der idealen Korrelation von 1:1. Die rote Diagonale stellt die orthogonale Regressionsgerade dar.

### 4.1.3 Partikel PM<sub>2,5</sub>

Für die Komponente PM<sub>2,5</sub> ergibt sich ein etwas besseres Bild, das dennoch nicht vollständig konsistent ist. Die Bestimmtheitsmaße liegen zwischen 0,33 und 0,88. Einheitlich gute Bestimmtheitsmaße ergeben sich an den Stationen MC171 und MC117. Gleichzeitig variieren die erweiterten Messunsicherheiten (bezogen auf 30 µg/m<sup>3</sup> PM<sub>2,5</sub>) von 20 % bis 120 %.

Wie die Streudiagramme der PM<sub>2,5</sub>-Vergleichsmessungen in Abbildung 10 veranschaulichen, ergeben sich die mäßigen Messunsicherheiten aufgrund einer fast durchgängigen systematischen Überschätzung der PM<sub>2,5</sub>-Konzentration durch die Sensorsysteme. Diese Überschätzung kann durch Anwendung einer linearen Funktion reduziert werden. Das zweite Sensorsystem an MC077 zeigt jedoch ein komplett gegenläufiges Verhalten - hier werden die PM<sub>2,5</sub>-Konzentrationen durch das Sensorsystem deutlich unterschätzt. Zudem zeigt das erste Sensorsystem an MC171 zeitweise bei Messwerten des Äquivalenz-Verfahrens von 10 bis 25 µg/m<sup>3</sup> sehr niedrige Messwerte nahe 0 µg/m<sup>3</sup> an. Dieses Verhalten war beim parallel betriebenen Sensorsystem nicht zu beobachten. Eine einheitliche Korrektur war daher auch bzgl. PM<sub>2,5</sub> anwendbar.

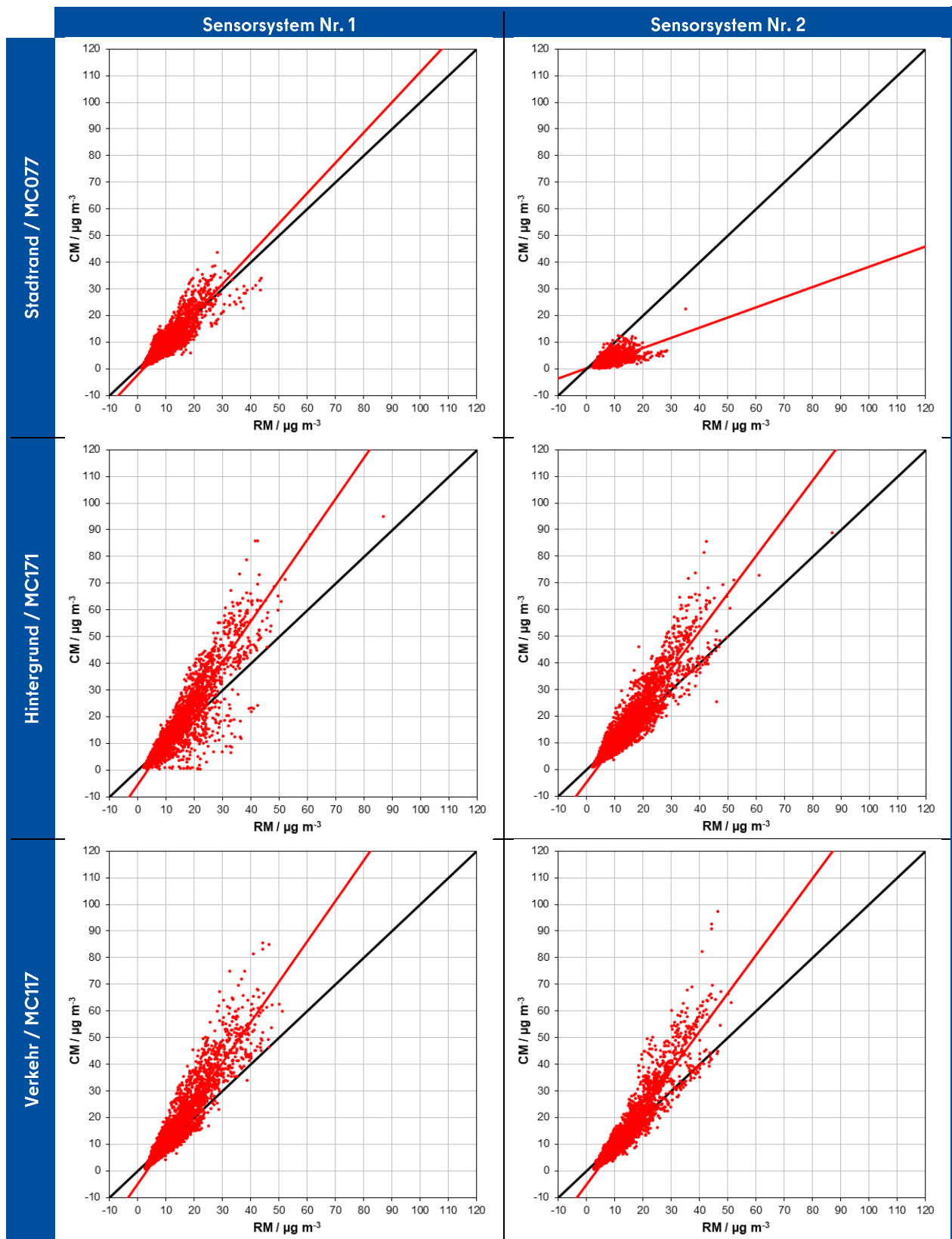


Abbildung 10: Streudiagramme der  $\text{PM}_{2,5}$ -Vergleichsmessungen der Sensorsysteme des Betreibers Bosch (CM) und des Referenzverfahren von BLUME (RM) während der zweiten Projektphase. Die schwarze Gerade entspricht der idealen Korrelation von 1:1. Die rote Diagonale stellt die orthogonale Regressionsgerade dar.

#### 4.1.4 Zusammenfassung

Die Messungen der zweiten Projektphase zeigten im Allgemeinen ähnliche Auffälligkeiten wie die vorangegangenen Messungen. Prinzipiell sind die Sensorsysteme in der Lage die Luftschadstoffe  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  oder  $\text{PM}_{2,5}$  mit guter Datenqualität zu erfassen. So kann bezüglich  $\text{NO}_2$  ein Bestimmtheitsmaß von 0,85 beziehungsweise bei den Partikeln bis 0,88 erreicht werden. Die erweiterte Messunsicherheit ist mit bestenfalls 33,9 % bezogen auf  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$ , 38,4 % bezüglich  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{10}$  und 20,6 % bezogen auf  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{2,5}$  als für den Einsatzzweck ausreichend zu bewerten.

Schwächen zeigen sich in der Homogenität der Daten. Zwei parallel betriebene Messgeräte, wie beispielsweise bezüglich der Komponente  $\text{NO}_2$  an der Messstation MC171, zeigen sehr unterschiedliche Bestimmtheitsmaße und Messunsicherheiten. Ferner ergaben sich bezüglich  $\text{NO}_2$  am Stadtrand eine sehr geringe Datenqualität mit erweiterten Messunsicherheiten von über 100% und geringen Bestimmtheitsmaßen von unter 0,2.

Verbesserungen hinsichtlich der erweiterten Messunsicherheit wären zum Teil mit einer linearen Korrektur der Daten möglich gewesen. Da die Sensorsysteme individuelle Abweichungen aufwiesen, die Linearität der Daten zum Teil nur bedingt gegeben war und noch keine Aussage zur Stabilität der Abweichungen möglich war, wurde in dieser Phase des Projekts auf eine Datenkorrektur verzichtet.

Hintergrund für diese Inhomogenität ist, dass bei drei Sensorsystemen bzgl. der  $\text{NO}_2$ -Sensorik sowie hinsichtlich der Partikel-Sensorik technische Fehler aufgetreten sind, die nicht kurzfristig erkannt wurden. Aufgrund der festgestellten Inhomogenität und der Problematik, dass Fehlfunktionen nicht kurzfristig erkannt werden konnten, wurde versucht, gemeinsam mit dem Betreiber eine Anpassung des Betriebskonzepts zu erwirken. Ergebnisse der Anpassungen sind in Abschnitt 4.2 aufgeführt.

## 4.2 Anwendung und Erweiterung des Betriebskonzepts sowie Erweiterung der Datenflüsse

Wie sich bereits bei den vorangegangenen Vergleichsmessungen in Phase 1 zeigte und durch den Betreiber in der Nachbesprechung angekündigt wurde, war bei den Sensorsystemen der Firma Bosch eine Applikation von Nullpunktkorrekturen und Datenvalidierungen zur Schaffung homogener Messdaten notwendig. Während der Vergleichsmessungen in Projektphase 2 wurde daher das vom Betreiber erarbeitete Betriebskonzept angewendet. Eine Wartung der Geräte war alle 12 Monate vorgesehen und im Rahmen der Vergleichsmessungen in Phase 2 noch nicht vorgesehen.

Wie sich aus den Messungen in der zweiten Projektphase (siehe Abschnitt 4.1) ergab, konnte mit dem angewandten Betriebskonzept zunächst keine homogene Datenqualität erzielt werden, da vor allem Fehlfunktionen der Sensorsysteme nicht rechtzeitig erkannt wurden. In Zusammenkünften mit dem Betreiber der Sensorsysteme wurden daher folgende Optimierungen angeregt:

- Es sollten erweiterte Nullpunktprüfungen angewandt werden. Zum einen sollten die diskontinuierlichen Prüfungen in Analogie zum bisherigen Betriebskonzept regelmäßiger durchgeführt werden. Zum anderen sollte eine kontinuierliche Plausibilitätsprüfung durchgeführt werden, bei der Messwerte unterhalb der Nachweisgrenze der Sensorsysteme mit einem Status versehen werden und Messdaten unterhalb der negativen Nachweisgrenze als ungültig deklariert werden.
- Darüber hinaus sollte der Betreiber in Erwägung ziehen, Vergleichsmessungen mit Referenzverfahren durchzuführen, um eine Empfindlichkeitsdrift der Sensorsysteme zu erkennen und auszugleichen.
- Zur Erkennung von Fehlfunktionen sollten Betriebs- und Fehler-Status der Sensorsysteme übertragen und regelmäßig geprüft werden.
- Weiterhin wurden Reaktionszeiten und Zuständigkeiten festgelegt. So sollte der Betreiber offensichtliche Fehlfunktionen innerhalb von drei Werktagen melden und binnen 14 Tagen beheben. Die Mitwirkung vom Luftgütemessnetz sollte nur erforderlich sein, wenn ein Zugang zum Messcontainer erforderlich ist. Nach Umsetzung der Optimierungen war eine erneute Vergleichsmessung vorgesehen, um in die Betriebsphase des Projekts (dritte Projektphase) überzugehen.

Seitens des Betreibers wurde die Umsetzbarkeit der Maßnahmen geprüft, schlussendlich jedoch mitgeteilt, dass der Gerätetyp der Sensorsysteme, die im Luftgütemessnetz betrieben werden, abgekündigt ist und ein neues Sensorsystem entwickelt wurde. Für das bisherige Sensorsystem hätte der Betreiber den Betrieb mit den bisher angebotenen Service-Dienstleistungen (jährliche Wartung mit Austausch von Sensorsystemen und Geräteüberprüfung im expliziten Fehlerfall) weiterhin anbieten können. Eine Erweiterung der qualitätssichernden Maßnahmen konnte für das abgekündigte System nicht angeboten werden. Ohne Erweiterungen des Betriebskonzepts inklusive der qualitätssichernden Maßnahmen konnten als Ergebnis der durchgeführten Vergleichsmessungen keine zuverlässig validen Messwerte abseits der Messstationen erhoben werden. Dies lag daran, dass die Sensorsysteme fehleranfällig waren, Fehlfunktionen nicht zuverlässig erkannt werden konnten und die Reaktionszeiten mit dem Service-Dienstleister mit Sitz in Baden-Württemberg nicht ausreichend waren.

### 4.3 Messergebnisse der weiterbetriebenen Sensorsysteme

In diesem Abschnitt werden die Daten der fortgeführten Vergleichsmessungen der Firmen Hawa Dawa und Smart City Factory aufgeführt. Wie in Abschnitt 3.4.3 angemerkt, erfolgten die Messungen mit software- oder hardwareseitig optimierten Sensorsystemen außerhalb des Projektes im eigenen Ermessen der beteiligten Firmen.

Es wurden alle von den Sensorsystemen als gültig deklarierte Daten im Zeitintervall vom 30.11.2022 12:00 bis zum jeweiligen Ende der Messungen (spätestens am 19.06.2024) ausgewertet. Analog zur Auswertung in Phase 1 wurden die Datenqualitätsparameter Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) und erweiterte Messunsicherheit (eMU) bestimmt und in Tabelle 13 gelistet.

**Tabelle 13: Abgeleitete Datenqualitätsparameter Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) und erweiterte Messunsicherheit (eMU, bezogen auf  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$ ,  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{10}$  bzw.  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{2,5}$ ) aus den fortgeführten Vergleichsmessungen von jeweils zwei Sensorsystemen der Firmen Hawa Dawa und Smart City Factory (SCF).**

	NO <sub>2</sub>		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2,5</sub>	
	R <sup>2</sup>	eMU	R <sup>2</sup>	eMU	R <sup>2</sup>	eMU
Hawa Dawa (MC117)	0,90	38,7	0,66	38,3	0,83	38,4
Hawa Dawa (MC171)	0,81	28,6	0,41	63,6	0,91	17,8
SCF (MC117) Nr. 1	0,32	74,1	0,33	50,8	0,41	64,1
SCF (MC117) Nr. 2	0,39	71,3	0,38	91,9	0,49	98,5

Die nach dem Betriebskonzept von Hawa Dawa weiterbetriebenen Sensorsysteme lieferten insbesondere für die Komponenten NO<sub>2</sub> und PM<sub>2,5</sub> vergleichsweise gute Ergebnisse. Bezüglich NO<sub>2</sub> wurden Bestimmtheitsmaß von 0,90 bzw. 0,81 erreicht, bei einer erweiterten Messunsicherheit von 29 bzw. 39 %. Im Vergleich zu Phase 1 stellt dies eine deutliche Verbesserung dar - hier waren bzgl. NO<sub>2</sub> Bestimmtheitsmaße von 0,30 bis 0,71 und erweiterte Messunsicherheiten von 31,1 % bis 55,0 % erreichbar. Hinsichtlich der Komponente PM<sub>10</sub> konnte keine deutliche Änderung der Datenqualität im Vergleich zur ersten Projektphase erzielt werden. Bezüglich PM<sub>2,5</sub> wurde mit den weiterbetriebenen Sensorsystemen von Hawa Dawa sehr gute Ergebnisse erzielt. Mit Bestimmtheitsmaßen von 0,83 bis 0,91 und erweiterten Messunsicherheit von 17,8 % bis 38,4% bestätigte sich die gute Datenqualität, die bereits in Phase 1 erzielt wurde (siehe Tabelle 5). In der ersten Projektphase lagen die besten PM<sub>2,5</sub>-Werte bei Hawa Dawa bei  $R^2 = 0,85$  und Unsicherheiten zwischen 16 % und 21 %, was eine moderate, aber relevante Verbesserung bedeutet. In den in Abbildung 11 dargestellten Streudiagrammen der Vergleichsmessungen sind das Abschneiden höherer Messwerte nicht mehr so deutlich wie noch bei den Messungen in Phase 1 zu erkennen. Ein leichtes Abschneiden höherer Messwerte ist dennoch bei NO<sub>2</sub> und PM<sub>2,5</sub> erkennbar.

Die Ergebnisse von Smart City Factory zeigen keine deutliche Verbesserung gegenüber der ersten Projektphase. Die optimierten Systeme erreichten für NO<sub>2</sub> lediglich ein Bestimmtheitsmaß von bestenfalls 0,39 bei einer hohen erweiterten Messunsicherheit von nicht besser als 71 %. In Phase 1 wurden für NO<sub>2</sub> noch Bestimmtheitsmaße von 0,12 bis 0,61 bei erweiterten Unsicherheiten von 44 % bis 251% erzielt. Auch bei PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub> blieben die Ergebnisse nicht zufriedenstellend. Die Bestimmtheitsmaße lagen bei maximal 0,49 bei erweiterten Unsicherheiten von 51 % bis 99 %. In Phase 1 wurden für diese Komponenten noch Bestimmtheitsmaße bis maximal 0,79 für PM<sub>10</sub> und 0,74 für PM<sub>2,5</sub> bei vergleichbaren oder geringeren Unsicherheiten erreicht. Abbildung 11 verdeutlicht diese Ergebnisse durch sehr breite Punktwolken und flache Regressionsgeraden mit ausgeprägter Streuung.

Der Vergleich zur ersten Projektphase zeigt, dass Hawa Dawa gezielte Verbesserungen in Teilen erzielen konnte, insbesondere durch den Einsatz dynamischer Kalibrieralgorithmen und angepasster Auswerteverfahren. Diese Maßnahmen führten zu messbar besseren Ergebnissen bei NO<sub>2</sub> und gleichbleibend guten Ergebnissen hinsichtlich PM<sub>2,5</sub>. Die Schwächen bei PM<sub>10</sub> blieben bestehen. Smart City Factory konnte trotz Austausch von Sensormodulen und angekündigtem Nachfolgemodell keine erkennbare Verbesserung gegenüber der ersten Phase nachweisen. Vielmehr deuten die Ergebnisse auf systematische Schwächen hin, die durch reine Hardware- oder Softwareoptimierungen nicht behoben werden konnten.

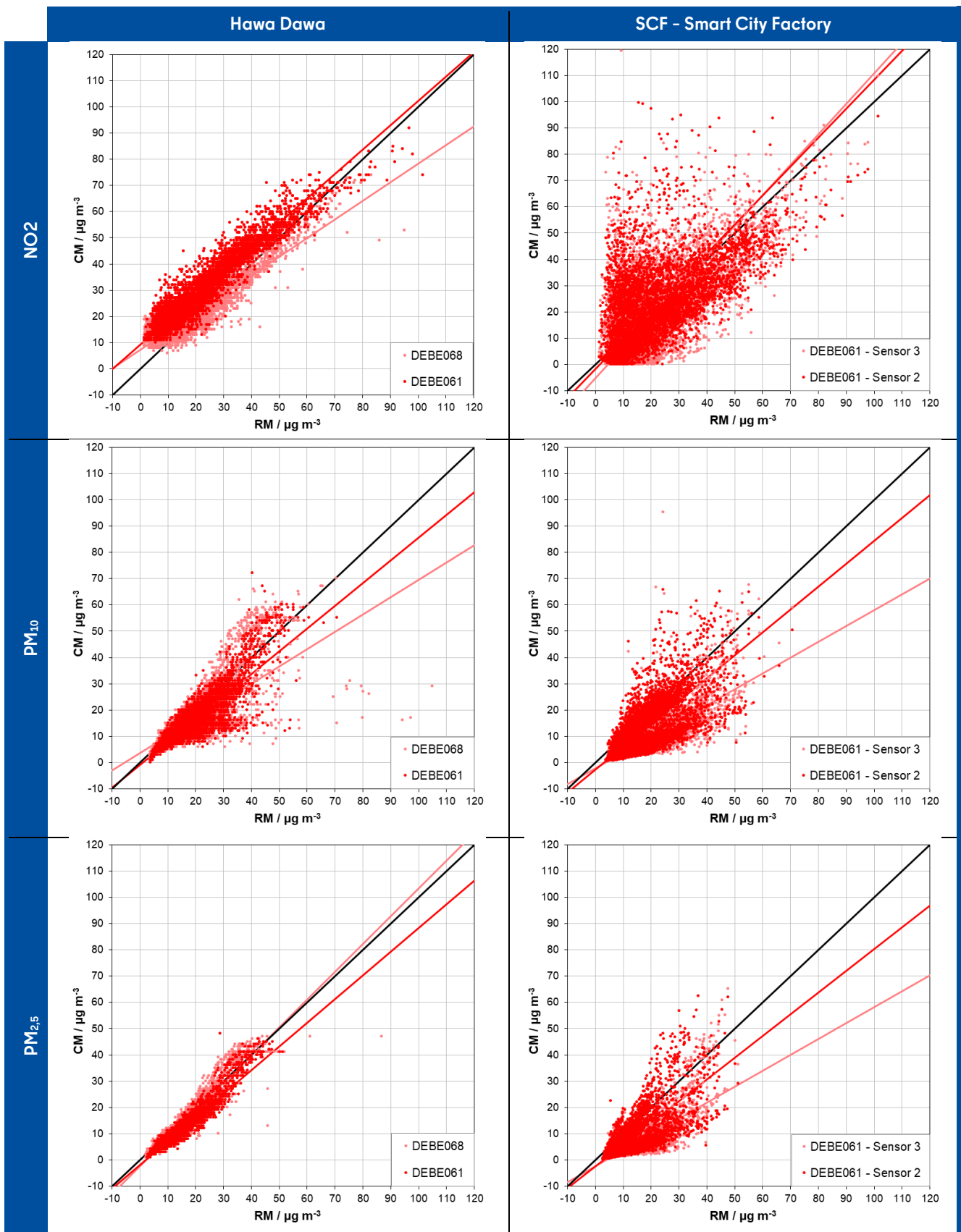


Abbildung 11: Streudiagramme der Vergleichsmessungen der zwei weiterbetriebenen Sensorsysteme (hellrot: erstes, dunkelrot: zweites Sensorsystem) der Betreiber Hawa Dawa (links) und Smart City Factory (rechts, jeweils CM) und des Referenzverfahren von BLUME (RM) für die Parameter NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub>. Die schwarze Gerade entspricht der idealen Korrelation von 1:1. Die roten Linien stellt die orthogonale Regressionsgerade dar.

# 5 VORZEITIGE BEENDIGUNG DES PROJEKTS

Trotz der in zwei Projektphasen erarbeiteten Erkenntnisse und Maßnahmen zur Verbesserung der Datenqualität und Integration der Sensorsysteme in das bestehende Luftgütemessnetz wurde das Projekt vorzeitig beendet. Die angestrebte Betriebsphase wurde nicht eingeleitet. Die Entscheidung zur Beendigung basierte auf vier zentralen Problemfeldern, die im Folgenden erläutert werden.

## Unzureichende Datenqualität

Bereits in der ersten Projektphase zeigten die Sensorsysteme teils erhebliche Abweichungen von den im Vorfeld eingereichten Datensätzen. Die Firma Bosch konnte zwar durch ein formal umfangreiches Betriebskonzept überzeugen und hatte in Aussicht gestellt, die Datenqualität durch dessen Anwendung zu verbessern. In der zweiten Projektphase bestätigte sich jedoch, dass bei drei der sechs installierten Systeme die erwartete Qualität auch unter Anwendung des Betriebskonzepts nicht erreicht wurde. Die Ursachen lagen unter anderem in technischen Ausfällen, mangelhafter Stabilität sowie unzureichender Fehlererkennung im laufenden Betrieb.

## Vergleichbarkeit / Drift der Sensorsysteme nicht gegeben

Ein gravierendes Problem bestand in der fehlenden Vergleichbarkeit der Sensorsysteme untereinander. Ein zuverlässiger Betrieb eines Luftgütemessnetzes setzt voraus, dass baugleiche Sensorsysteme vergleichbare und stabile Messergebnisse liefern. Im Projektverlauf zeigte sich jedoch, dass dies nicht gewährleistet war. Die beobachteten Unterschiede zwischen den Geräten ließen sich nicht durch äußere Einflüsse erklären, sondern waren überwiegend auf technische Defekte und vermutlich eine Sensordrift zurückzuführen. Da die Abweichungen geräteabhängig waren, konnten keine allgemeinen Korrekturfunktionen ermittelt und zur Steigerung der Datenqualität angewandt werden.

## Mangelnde Erweiterbarkeit des Betriebskonzepts

Aufgrund der inhomogenen bzw. gerätespezifischen Datenqualität, die sich im Rahmen der Vergleichsmessungen in Phase 2 zeigte, wurden mit der Fa. Bosch Videokonferenzen geführt, in denen versucht wurde, durch eine Erweiterung des Betriebskonzepts qualitätssichernde Maßnahmen zu etablieren, um die Datenqualität zu steigern. In der letzten Videokonferenz wurde durch Bosch mitgeteilt, dass der Gerätetyp der Sensorsysteme, die im Berliner Luftgütemessnetz betrieben werden, abgekündigt ist und ein neues Sensorsystem entwickelt wurde. Eine Erweiterung der qualitätssichernden Maßnahmen konnte für das abgekündigte System, welche aber für die Erhebung valider Messdaten abseits der Messstationen erforderlich sind, seitens Bosch nicht angeboten werden.

## Umstieg auf die neue Generation von Sensorsystemen vergaberechtlich nicht möglich

In der letzten Videokonferenz bot Bosch die Möglichkeit an, auf eine neue Generation von Sensorsystemen umzusteigen. Ein Wechsel auf das neue System war ohne eine Neuausschreibung vergaberechtlich nicht realisierbar. Ferner wäre eine Neuausschreibung im verbleibenden zeitlichen Rahmen des Projekts nicht durchführbar gewesen. Da es sich bei der neuen Generation um vollständig andere Sensorsysteme handelte, hätte wieder mit der ersten Projektphase begonnen werden müssen.

Alle Sensorsysteme wurden spätestens am 19.06.2023 deinstalliert und an die Betreiber zurückgegeben.

## 6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messcontainer DEBE061 (MC117 Schildhornstraße) kurz vor dem Beginn der Vergleichsmessungen der ersten Projektphase am 30.06.2022.....	9
Abbildung 2: Dachansicht des Messcontainers DEBE068 (MC171 Mitte) im Oktober 2022 zur Beendigung der Vergleichsmessungen in der ersten Projektphase. ....	10
Abbildung 3: Streudiagramm der NO <sub>2</sub> -Vergleichsmessungen zwischen den Sensorsystemen (CM) und dem Referenzverfahren von BLUME (RM). (A) Sensorsysteme von Bosch; (B) Sensorsysteme von Hawa Dawa; (C) Sensorsysteme von Smart City Factory. Die schwarze Gerade entspricht der idealen Korrelation von 1:1. Die rote Diagonale stellt die orthogonale Regressionsgerade dar.....	14
Abbildung 4: Streudiagramm der PM <sub>10</sub> -Vergleichsmessungen zwischen den Sensorsystemen (CM) und dem Äquivalenzverfahren von BLUME (RM). (A) Sensorsysteme von Bosch; (B) Sensorsysteme von Hawa Dawa; (C) Sensorsysteme von Smart City Factory. Die schwarze Gerade entspricht der idealen Korrelation von 1:1. Die rote Diagonale stellt die orthogonale Regressionsgerade dar.....	15
Abbildung 5: Streudiagramm der PM <sub>2,5</sub> -Vergleichsmessungen zwischen den Sensorsystemen (CM) und dem Äquivalenzverfahren von BLUME (RM). (A) Sensorsysteme von Bosch; (B) Sensorsysteme von Hawa Dawa; (C) Sensorsysteme von Smart City Factory. Die schwarze Gerade entspricht der idealen Korrelation von 1:1. Die rote Diagonale stellt die orthogonale Regressionsgerade dar.....	16
Abbildung 6: Messung mit einem Sensorsystem an der Sondermessstation MC014 zur Erfassung der Luftschadstoffbelastung in der Nähe der A100 im Bezirk Charlottenburg-Wilmersdorf.....	24
Abbildung 7: Sensorsystem an der Messstation MC077 Buch am Stadtrand zur Prüfung des Messsystems bei geringer Stickstoffdioxid- und Partikelkonzentration.....	25
Abbildung 8: Streudiagramme der NO <sub>2</sub> -Vergleichsmessungen der Sensorsysteme des Betreibers Bosch (CM) und der Referenzverfahren von BLUME (RM) während der zweiten Projektphase. Die schwarze Gerade entspricht der idealen Korrelation von 1:1. Die rote Diagonale stellt die orthogonale Regressionsgerade dar.....	27
Abbildung 9: Streudiagramme der PM <sub>10</sub> -Vergleichsmessungen der Sensorsysteme des Betreibers Bosch (CM) und der Referenzverfahren von BLUME (RM) während der zweiten Projektphase. Die schwarze Gerade entspricht der idealen Korrelation von 1:1. Die rote Diagonale stellt die orthogonale Regressionsgerade dar.....	29
Abbildung 10: Streudiagramme der PM <sub>2,5</sub> -Vergleichsmessungen der Sensorsysteme des Betreibers Bosch (CM) und des Referenzverfahren von BLUME (RM) während der zweiten Projektphase. Die schwarze Gerade entspricht der idealen Korrelation von 1:1. Die rote Diagonale stellt die orthogonale Regressionsgerade dar.....	31
Abbildung 11: Streudiagramme der Vergleichsmessungen der zwei weiterbetriebenen Sensorsysteme (hellrot: erstes, dunkelrot: zweites Sensorsystem) der Betreiber Hawa Dawa (links) und Smart City Factory (rechts, jeweils CM) und des Referenzverfahren von BLUME (RM) für die Parameter NO <sub>2</sub> , PM <sub>10</sub> und PM <sub>2,5</sub> . Die schwarze Gerade entspricht der idealen Korrelation von 1:1. Die roten Linien stellt die orthogonale Regressionsgerade dar. ....	34

## 7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitlicher Ablauf des Projekts.....	4
Tabelle 2: Mindestanforderungen an die Sensorsysteme zur Überwachung der Luftgüte zur Teilnahme am Vergabeverfahren .....	6
Tabelle 3: Bewertungsmatrix zur Vorauswahl von maximal drei Auftragnehmern für die Messungen im Berliner Luftgütemessnetz während der ersten Projektphase (es wurde keine lineare Korrektur der Messdaten vorgenommen).....	8
Tabelle 4: Datenverfügbarkeit der Sensorsysteme während der Vergleichsmessungen in der ersten Projektphase (schwarz hinterlegte Sensorsysteme wurden aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit nicht bewertet). .....	11
Tabelle 5: Datenqualitätskenngrößen „Bestimmtheitsmaß“ ( $R^2$ ) und „erweiterte Messunsicherheit“ (U), die aus der Vergleichsmessung jedes individuellen Sensorsystems mit dem zugehörigen Referenz- bzw. Äquivalenzverfahren aus den Messungen in der ersten Projektphase abgeleitet wurden (schwarz hinterlegte Sensorsysteme wurden aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit nicht bewertet). .....	12
Tabelle 6: Rangfolge je Standort und Betreiber verwendeten drei Sensorsysteme hinsichtlich der Datenqualitätskenngrößen „Bestimmtheitsmaß“ ( $R^2$ ) und „erweiterte Messunsicherheit“ (U), die aus der Vergleichsmessung jedes individuellen Sensorsystems mit dem zugehörigen Referenz- bzw. Äquivalenzverfahren aus den Messungen in der ersten Projektphase abgeleitet wurden (1: Sensorsystem mit der besten Datenqualitätskenngröße; 3: Sensorsystem mit der schlechtesten Datenqualitätskenngröße). .....	13
Tabelle 7: Kombination der besten zwei Sensorsysteme zur Bestimmung der Datenqualitätskriterien gem. Tabelle 6. ....	13
Tabelle 8: Vergleich der Datenqualitätsparameter aus den Vergleichsmessungen der ersten Projektphase (BLUME) sowie der eingereichten Datensätze der Betreiber (AN) im Rahmen der Vorauswahl (grün: deutliche Verbesserung gegenüber des eingereichten Datensatzes; rot: deutliche Verschlechterung gegenüber des eingereichten Datensatzes). .....	17
Tabelle 9: Punktevergabe bei der Bewertung der Betriebskonzepte (mit „+“ sind positive und mit „-“ sind negative Aspekte des Betriebskonzepts gekennzeichnet, die Punktzahl ergibt sich aus der im Text dargestellten Einschätzung ) .....	21
Tabelle 10: Bewertungsmatrix zur Auswahl eines Auftragnehmers für die Messungen im Berliner Luftgütemessnetz während der Projektphasen zwei und drei (es wurde keine lineare Korrektur der Messdaten vorgenommen) .....	22
Tabelle 11: Zusammenfassung der Rücksprachen mit den Anbietern nach den Messungen in der ersten Projektphase .....	23
Tabelle 12: Vergleich der aus den Vergleichsmessungen der zweiten Projektphase abgeleiteten Datenqualitätsparameter Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) und erweiterte Messunsicherheit (eMU, bezogen auf $40 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$ , $50 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{10}$ bzw. $30 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{2,5}$ ). .....	25
Tabelle 13: Abgeleitete Datenqualitätsparameter Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) und erweiterte Messunsicherheit (eMU, bezogen auf $40 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$ , $50 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{10}$ bzw. $30 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{2,5}$ ) aus den fortgeführten Vergleichsmessungen von jeweils zwei Sensorsystemen der Firmen Hawa Dawa und Smart City Factory (SCF).....	33

Senatsverwaltung  
für Mobilität, Verkehr,  
Klimaschutz und Umwelt

**BERLIN**



Öffentlichkeitsarbeit  
Am Köllnischen Park 3  
10179 Berlin

[www.berlin.de/sen/mvku](http://www.berlin.de/sen/mvku)

[instagram.com/senmvkuberlin](https://www.instagram.com/senmvkuberlin)

[youtube.com/@senmvkuberlin](https://www.youtube.com/@senmvkuberlin)

[linkedin.com/company/senmvku](https://www.linkedin.com/company/senmvku)

Berlin, 12/2025