

Stand: April 2026

Evaluierung der korrigierten CAMS-Prognosen für das Luftdatenportal des Umweltbundesamtes

Daten des Jahres 2024

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	6
2	Eingangsdaten.....	7
2.1	Messdaten und Metadaten	7
2.2	Modelldaten	7
3	Korrekturverfahren	8
4	Testumgebung	9
5	Ergebnisse.....	12
5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	12
5.2	Evaluierung der CAMS-Prognose mit und ohne Korrektur für den Luftschadstoff Feinstaub PM ₁₀	15
5.3	Evaluierung der CAMS-Prognose mit und ohne Korrektur für den Luftschadstoff Feinstaub PM _{2,5}	18
5.4	Evaluierung der CAMS-Prognose mit und ohne Korrektur für den Luftschadstoff Ozon.....	20
5.5	Evaluierung der CAMS-Prognose mit und ohne Korrektur für den Luftschadstoff Stickstoffdioxid	23
6	Anhang Ergebnistabellen	26

Abbildungen

Abbildung 1: Bias bezogen auf den PM_{10} , Tagesmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr	16
Abbildung 2: Soccerplot bezogen auf PM_{10} , Tagesmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr	17
Abbildung 3: Scatterplot für PM_{10} , Tagesmittelwert, Station DEBB021, Gesamtjahr	17
Abbildung 4: Bias für $PM_{2,5}$ gleitenden Tagesmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr	18
Abbildung 5: Soccerplot $PM_{2,5}$ gleitenden Tagesmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr	19
Abbildung 6: Scatterplot für $PM_{2,5}$ Einstundenmittelwerte, Hintergrund, Station DEHB012, Gesamtjahr	19
Abbildung 7: Bias für Ozon, 1TMAX, Hintergrund, Gesamtjahr	21
Abbildung 8: Bias für Ozon, SMW, Hintergrund, Gesamtjahr	21
Abbildung 9: Soccerplot für Ozon, Einstundenmittelwerte, Hintergrund, Gesamtjahr	22
Abbildung 10: Scatterplot für Ozon, Einstundenmittelwerte, Station DEBB021, Gesamtjahr ...	22
Abbildung 11: Bias für NO_2 , Einstundenmittelwerte, Verkehr, Episode	24
Abbildung 12: Soccerplot für NO_2 , Einstundenmittelwerte, Verkehr, Episode.....	24
Abbildung 13: Scatterplot für NO_2 , Einstundenmittelwerte, Station DEHB006, Episode	25

Tabellen

Tabelle 1: Statistische Kenngrößen und Metriken.....	9
Tabelle 2: Luftqualitätsindex Umweltbundesamt 2024	11
Tabelle 3: Zusammenfassung der Ergebnisse	14
Tabelle 8: Metriken PM ₁₀ Tagesmittelwert, HG, Gesamtjahr, Schwellenwert 50 µg/m ³	26
Tabelle 9: Metriken PM ₁₀ Tagesmittelwert, Hintergrund, Episode, Schwellenwert 50µg/m ³	26
Tabelle 10: Metriken PM ₁₀ Tagesmittelwert, Verkehr, Gesamtjahr, Schwellenwert 50 µg/m ³ ..	27
Tabelle 11: Metriken PM ₁₀ gleitender Tagesmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr,.....	27
Tabelle 12: Metriken PM ₁₀ gleitender Tagesmittelwert, Hintergrund, Episode,.....	28
Tabelle 13: Metriken PM ₁₀ gleitendes Tagesmittelwert, Verkehr, Gesamtjahr,	29
Tabelle 14: Metriken PM _{2,5} gleitendes Tagesmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr,	29
Tabelle 15: Metriken PM _{2,5} gleitendes Tagesmittelwert, Hintergrund, Episode,	30
Tabelle 16: Metriken PM _{2,5} gleitendes Tagesmittelwert, Verkehr, Gesamtjahr,	31
Tabelle 17: Metriken NO ₂ Einstundenmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr,.....	31
Tabelle 18: Metriken NO ₂ Einstundenmittelwert, Verkehr, Gesamtjahr,	32
Tabelle 19: Metriken O ₃ Einstundenmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr,	33
Tabelle 20: Metriken O ₃ Einstundenmittelwert, Hintergrund, Episode,	34
Tabelle 21: Metriken O ₃ Höchster Einstundenmittelwert des Tages, Hintergrund, G-jahr,.....	34
Tabelle 22: Metriken O ₃ Höchster Einstundenmittelwert des Tages, Hintergrund, Episode,	35
Tabelle 23: Metriken O ₃ Höchster Achtstundenmittelwert des Tages, HG, Gesamtjahr,	36
Tabelle 24: Metriken O ₃ Höchster Achtstundenmittelwert des Tages, Hintergrund, Episode,...	36

Quellen:

1. Benutzeranleitung Testumgebung Luftschadstoffprognose Version 3.1, IVU Umwelt GmbH Emmy-Noether-Str. 2, D-79110 Freiburg, Mai 2024
2. Abschlussbericht Erweiterung der Luftschadstoffprognosen des Umweltbundesamtes von: Lina Neunhäuserer, Volker Diegmann, IVU Umwelt GmbH, Freiburg, 02/2024, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erweiterung-der-luftschadstoffprognosen-des>
3. Evaluation and comparison of different air quality forecasting systems Project No. 174856 for the Umweltbundesamt, Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau by IVU Umwelt, submitted 26.05.2023
4. Luftqualität 2024 - Vorläufige Auswertung, Umweltbundesamt, Februar 2025, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/luftqualitaet-2024>
5. CAMS Assessment Report on European Air Quality 2024 <https://atmosphere.copernicus.eu/node/1330>
6. Sicherstellung der Ozonprognose. Abschlussbericht. Veröffentlichung UBA-Texte 70/2019. IVU Umwelt (2018), <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sicherstellung-der-ozonprognose>

1 Einführung

Das Umweltbundesamt stellt stündlich für seinen Internetauftritt und die Luftqualitäts-App¹ Prognosedaten für die Luftschadstoffe Feinstaub PM₁₀, Feinstaub PM_{2,5}, Ozon und Stickstoffdioxid auf Basis korrigierter CAMS-Prognosedaten zur Verfügung.

Der Copernicus Atmosphärendienst (Copernicus Atmosphere Monitoring Service, CAMS, <https://atmosphere.copernicus.eu/>) stellt originale Prognosedaten bereit, die auf Ergebnissen von aktuell 11 Chemie-Transport-Modellen (CTM) beruhen, die teilweise durch Satellitendaten optimiert werden.

Diese CAMS-Prognosedaten zu den benannten Luftschadstoffen werden vom Umweltbundesamt vom Copernicus Atmosphärendienst täglich in stündlicher Auflösung für den aktuellen Tag und die drei folgenden Tage heruntergeladen und mit Hilfe einer von IVU Umwelt (2018) entwickelten Hybrid-Vorhersage korrigiert.

Die vorliegende Evaluierung der Prognosedaten hat das Ziel, die unkorrigierten CAMS-Prognosedaten an Hand statistischer Metriken mit den korrigierten Prognosedaten und den Messdaten der Luftgütemessnetze Deutschlands zu vergleichen und die Qualität beider Prognosedatensätze zu quantifizieren.

Im hier beschriebenen Verfahren werden die unkorrigierten und die mit der am UBA verwendeten Hybrid-Vorhersage korrigierten CAMS-Prognosen mit Hilfe der Testumgebung (R-Skript) „Luftschadstoffprognose Version 3.1“ der IVU Umwelt GmbH (2024) evaluiert und jeweils mit den Messdaten verglichen. Die Berechnungen erfolgten in verschiedenen Läufen je Luftschadstoff, entweder für Messwerte des ganzen Jahres (hier 2024) oder für Episoden hoher Luftschadstoffkonzentration.

Der Bericht richtet sich an Nutzende der Prognosedaten wie Luftmessnetze der Bundesländer, Forschende etc., die regelmäßig auf die vom Umweltbundesamt veröffentlichten Prognosen zugreifen und sie weiterverwenden. Aus dem Bericht soll erkennbar sein, inwieweit für die verwendeten Daten des aktuellen Jahres eine deutliche Verbesserung der CAMS-Prognosedaten durch die Hybrid-Vorhersage erfolgt und damit eine Prognose zukünftiger Schadstoffbelastung verlässlich ist.

Evaluierung und Bericht werden jährlich aktualisiert, sodass zukünftig einzelne Jahresvalidierungen verglichen werden können.

¹ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftdaten>
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftqualitaet/app-luftqualitaet>

2 Eingangsdaten

Für die Evaluierung der unkorrigierten und korrigierten Prognosedaten sind folgende Eingabedaten nötig:

- Messdaten der Luftschadstoffmessungen aus der Messdatenbank des Umweltbundesamtes für die Schadstoffe Feinstaub PM₁₀, Feinstaub PM_{2,5}, Ozon und Stickstoffdioxid
- Metadaten der entsprechenden Luftmessstationen in Deutschland mit Angaben zu Koordinaten und Stationstyp
- CAMS-Prognosedaten in Form von stündlichen NetCDF-Dateien
- Korrigierte CAMS-Prognosedaten (diese sind ein Teilergebnis der durchgeführten Berechnungen).

2.1 Messdaten und Metadaten

Für die Evaluierung wurden aus der Datenbank des Umweltbundesamtes zu den Luftschadstoffdaten (Immissionsdatenbank II 4.2) Messdaten als Einstundenmittelwerte aus dem Jahr 2024 zu Feinstaub PM₁₀, Feinstaub PM_{2,5}, Ozon und Stickstoffdioxid mit der Bezugszeitzone MEZ exportiert.

Der Export beschränkte sich auf Daten, die zum Datenaustausch frei gegeben sind. Der Datensatz umfasst jeweils Luftmessstationen des gesamten Bundesgebietes.

Um den Rechenaufwand der Testumgebung möglichst gering zu halten, wurden aus der Immissionsdatenbank sogenannte invertierte Daten exportiert. Dadurch konnte die Neusortierung in der Testumgebung eingespart werden, was die Rechenzeit deutlich reduziert.

Im Prozess der Evaluierung werden die Daten in UTC umgerechnet, um mit den CAMS-Prognosedaten vergleichbar zu sein.

Die Metadaten stammen ebenso aus der Immissionsdatenbank II 4.2. Sie beinhalten Angaben zum Stationscode als verbindendes Feld zu den Messdaten, zu Koordinaten der Luftmessstationen für die Verschneidung der Messdaten mit den CAMS-Prognosen, die geografische Höhe und die Zuordnung zur Stationsklassifizierung Hintergrund (HG) für Hintergrundstationen und Verkehr für verkehrsbezogen messende Stationen. Je nach Komponente unterscheidet sich die Anzahl der Luftmessstationen, die in der Auswertung berücksichtigt wurden. Maximal 265 Stationen für den Hintergrund und 145 verkehrsnah messende Stationen flossen in die Berechnungen mit ein.

2.2 Modelldaten

Die Modelldaten von CAMS lagen für das Bezugsjahr 2024 als gitterbezogene NetCDF-Daten vor. Es handelt sich dabei um stündliche Momentanwerte mit der Bezugszeitzone UTC. Im Prozess der Evaluierung besteht die Möglichkeit, die Momentanwerte der unkorrigierten Prognosedaten zu Einstundenmittelwerte zu mitteln, um eine gleiche Skalierung vergleichbar mit den Messdaten zu erhalten.

Die modellierten CAMS-Prognosedaten sind flächenbezogene Konzentrationswerte in einer horizontalen Auflösung von 7*11km².

3 Korrekturverfahren

Die Hybrid-Vorhersage ist ein einfaches und erprobtes Verfahren zur Korrektur von Luftschadstoffprognosen, die mit Hilfe von Chemie-Transport-Modell-Rechnungen (CTM) erzeugt wurden. Dabei wird ein für einen Messort für den zukünftigen Zeitpunkt $t+\Delta t$ prognostizierter Modellwert C_{mod} mit dem Mittelwert der Differenzen zwischen Messwert C_{obs} und Modellwert C_{mod} an diesem Ort zu n Vorlauf früheren Zeitpunkten korrigiert:

$$C_{mod,t+\Delta t}^{korr} = C_{mod,t+\Delta t} + \frac{1}{n_{Vorlauf}} \sum_{k=1}^{n_{Vorlauf}} (C_{obs,k} - C_{mod,k})$$

(Quelle IVU 2018)

IVU empfiehlt nach ausführlichen Tests $n_{Vorlauf}$ auf einen Tag zu setzen. Dabei wird der prognostizierte Modellwert immer mit der Differenz zwischen Mess- und Modellwert vom Vortag zur selben Stunde korrigiert.

Vor der Korrektur (Hybrid-Vorhersage) werden die negativen Messwerte auf Null gesetzt, während bei der Rechnung ohne Korrektur die negativen Werte in die Berechnung mit einfließen. Daraus ergeben sich bei der Betrachtung der Metriken MinObs (kleinster gemessener Wert), MeanObs (mittlerer gemessener Wert) und SDObs (Standardabweichung der Messwerte) jeweils Unterschiede.

Bei der Korrektur mit der Hybridvorhersage kann es dazu kommen, dass negative Modellwerte $< 0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entstehen. Diese werden auf den unkorrigierten Wert der CAMS-Prognose gesetzt. Der Einfluss dieser Annahme auf den statistischen Kennwerten der Berechnung wird von IVU als gering eingeschätzt.

Zusätzlich wird eine Wochentags- und eine Feiertagskorrektur bei Stickstoffdioxid an den Stationen des Typs Verkehr vorgenommen. Stickstoffdioxid, welches stärker als die anderen Schadstoffe mit den Emissionen des Straßenverkehrs korreliert ist, zeigt insbesondere an Stationen mit dem Stationstyp Verkehr einen klaren Wochentag- und Feiertagsgang. Würde man einzig mit der Hybrid-Vorhersage unter Benutzung des $n_{Vorlaufes} = 1$ Tag die CAMS-Prognosedaten korrigieren, erhielte man zum Beispiel für den Montag den Korrekturfaktor aus der Differenz Modell zu Messung vom Sonntag. Da aber die Stickstoffdioxid am Sonntag deutlich geringer sind als am Montag unterschätzt diese Korrektur.

Dem korrigierten Modellwert wird demnach eine Wochentagskorrektur addiert, die sich aus den dem Mittelwert der Differenzen der Korrekturwerte von Dienstag (die den Fehler von Montag enthalten) und Montag (die den Fehler von Sonntag enthalten) über n zurückliegende Wochen ergibt. Als beste Einstellung für die zurückliegenden Wochen empfiehlt IVU (2024) $n=26$.

Bei der Feiertagskorrektur wird unterschieden nach Normaltag, Feiertage und Ferientage. Dabei wird angenommen, dass das Konzentrationsniveau an Feiertagen niedriger als an Ferientagen und an Ferientagen wiederum niedriger als an Normaltagen ist (IVU 2024).

Hierbei wird zur Korrektur eine Kombination aus Mittelwerten zwischen Korrekturfaktoren über n Wochen zurückliegend herangezogen.

Auch hier empfiehlt IVU (2024) $n=26$ für die bei der Korrektur betrachteten zurückliegenden Wochen.

Feiertag- und Wochentagskorrektur können gemeinsam oder einzeln berücksichtigt werden. Diese zusätzlichen Korrekturen erfolgen stundengenau.

4 Testumgebung

Die Evaluierung der korrigierten Prognosewerte erfolgten mit der von der IVU Umwelt GmbH entwickelten Testumgebung „Luftschadstoffprognose Version 3.1“ (1). Die Testumgebung wurde im Rahmen eines UBA-Projektes entwickelt und in der Skriptsprache „R“ programmiert.

Für die Luftschadstoffe Feinstaub PM₁₀, Feinstaub PM_{2.5}, Ozon und Stickstoffdioxid beinhaltet die Testversion Funktionalitäten zur Berechnung.

Messdaten, Stationsmetadaten und die CAMS-Prognosedaten fließen als Eingangsdaten in die Berechnungen ein. Eine Liste der Feier-, Ferien- und Wochentage kann für eine Wochentags- und Feiertagskorrektur für die Berechnung mit Stickstoffdioxid an Verkehrsstationen verwendet werden.

Das Tool gibt entsprechend berechnete Zeitreihen für Messwerte, unkorrigiert und korrigierte Prognosedaten und die Korrekturfaktoren aus. Ebenso werden statistische Kenngrößen und Metriken, sowie Grafiken und Textdateien zur weiteren Verwendung und Auswertung ausgegeben.

Folgende statistische Kenngrößen und Metriken werden betrachtet:

Tabelle 1: Statistische Kenngrößen und Metriken

Metrik	Abkürzung und Einheit
Minimum der Messwerte	Min Obs [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Minimum der Modellwerte	Min Mod [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Mittelwert der Messwerte	Mean Obs [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Mittelwert der Modellwerte	Mean Mod [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Maximum der Messwerte	Max Obs [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Maximum der Modellwerte	Max Mod [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Standardabweichung der Messwerte	SD Obs [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Standardabweichung der Modellwerte	SD Mod [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Korrelationskoeffizient nach Pearson	[-]
Root Mean Square Error	RMSE [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Bias	Bias [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Mean Fractional Bias	MFB [%]
Fractional Gross Error	FGE [%]
Anzahl der gemessenen Überschreitungen	MeasExc [-]
Hit Rate	Hit Rate [%]
False Alarm Rate	FAR [%]
Heidke-Skill-Score	HSS [-]
Critical Success Index	CSI [%]
Bias Ratio	BiasRatio [-]

Minimum, Mittelwert, Maximum und Standardabweichung dienen der statistischen Charakterisierung der Datenreihen sowohl der Mess- als auch der Modelldaten und liefern Hinweise auf die Güte der modellierten Werte. Der Korrelationskoeffizient zwischen Mess- und Modelldaten stellt ein Maß für die Übereinstimmung ihres zeitlichen Verlaufs dar.

Der Root Mean Square Error (RMSE) quantifiziert sowohl systematische als auch unsystematische (zufällige) Modellfehler. Er basiert auf der Standardabweichung der Differenzen zwischen Mess- und Modelldaten und eignet sich insbesondere zum Vergleich der Modellgüte für einen gegebenen Datensatz.

Der Bias beschreibt den systematischen Fehler eines Modells und gibt an, ob Messwerte tendenziell über- oder unterschätzt werden. Der Mean Fractional Bias (MFB) sowie der Fractional Gross Error (FGE) charakterisieren die relative Über- bzw. Unterschätzung unter Einbeziehung der Mittelwerte von Mess- und Modelldaten.

Zur Bewertung der Vorhersagegüte hinsichtlich der Detektion von Schwellenwertüberschreitungen werden die Hit Rate, die False Alarm Rate (FA Rate), der Heidke Skill Score (HSS) sowie der Critical Success Index (CSI) herangezogen.

Die Testumgebung ermöglicht durch Eingabe der Variablen nRelax ein Zeitfenster für den betrachteten Termin der Überschreitung anzurechnen. Die Eingabe von nRelax = 2 bedeutet ein Zeitfenster der Länge $\pm nRelax$ um den jeweiligen Termin, in dem eine gemessene Überschreitung als durch das Modell erfasst gilt. Die dabei berechneten Metriken für die Schwellenwertüberschreitung erhalten in der Kennung ein „W“ (HitRateW, FARate, HSSW, CSIW, BiasRatioW). Die Erweiterung des Zeitfensters führt zu einer Erhöhung der berechneten Werte.

Die Hit Rate steht für den Anteil der korrekt vorhergesagten Schwellenwertüberschreitung, die False Alarm Rate für die fälschlicherweise vorhergesagten Schwellenwertüberschreitungen.

Der HSS wird verstanden als zusammenfassende Größe für die beiden Metriken Hit Rate und FA Rate. Der Critical Success Index zeigt den Anteil der korrekt vorhergesagten Schwellenwertüberschreitungen an der Gesamtheit der gemessenen und / oder modellierten Schwellenwertüberschreitungen, und die Bias Ratio gibt das Verhältnis der modellierten zu den gemessenen Schwellenwertüberschreitungen an.

In der Testumgebung werden folgende Schwellenwerte berücksichtigt:

- NO₂, Einstundenmittelwert: 40 µg/m³ und 100 µg/m³ (ohne und mit Zeitfenster)
- Ozon, Einstundenmittelwert: 120 µg/m³ (ohne und mit Zeitfenster)
- Ozon, maximaler Einstundenmittelwert des Tages: 180 µg/m³ (Informationsschwelle) und 240 µg/m³ (Alarmschwelle),
- Ozon, maximaler Achtstundenmittelwert des Tages: 120 µg/m³,
- PM₁₀, Tagesmittelwert: 50 µg/m³,
- PM₁₀, gleitender Tagesmittelwert: 35 µg/m³ (ohne und mit Zeitfenster)
- PM_{2,5}, gleitender Tagesmittelwert: 20 µg/m³ (ohne und mit Zeitfenster)

Die Schwellenwerte für NO₂ entsprechen den Categorieschwellen des Luftqualitätsindex (LQI) des Umweltbundesamtes von 2024 (siehe Tabelle 2) von gut zu mäßig (40µg/m³) bzw. von mäßig zu schlecht (100 µg/m³). Für Ozon beziehen sich die Schwellenwerte auf die Categorieschwelle von gut zu mäßig des LQI für den Einstundenmittelwert und auf den Grenzwert bezogen auf den maximaler Achtstundenmittelwert des Tages. Für PM10 wurde der

Schwellenwert für das Tagesmittel vom Tagesgrenzwert abgeleitet, der gleitende Mittelwert ergibt sich, wie auch beim PM_{2,5} aus der Kategorieschwelle von gut zu mäßig des LQI.

Tabelle 2: Luftqualitätsindex Umweltbundesamt 2024

Index	Stundenmittel NO ₂ in µg/m ³	stündlich gleitendes Tagesmittel PM ₁₀ in µg/m ³	stündlich gleitendes Tagesmittel PM _{2,5} in µg/m ³	Stundenmittel O ₃ in µg/m ³
sehr schlecht	> 200	> 100	> 50	> 240
schlecht	101-200	51-100	26-50	181-240
mäßig	41-100	36-50	21-25	121-180
gut	21-40	21-35	11-20	61-120
sehr gut	0-20	0-20	0-10	0-60

Der vorliegende Bericht konzentriert sich auf den Median der Metriken über alle Luftmessstationen bezüglich der oben genannten Schwellenwerte wie Hit Rate, False Alarm Rate (FA Rate), Heidke-Skill-Score (HSS), der Critical Success Index (CSI) und Bias Ratio, sofern die genannten Metriken aussagekräftig sind. Diese Metriken eignen sich besonders, um die Güte eines Modells zu bewerten und zu sehen, wie insbesondere Schwellenwertüberschreitungen vom Modell korrekt dargestellt werden oder nicht. Die ausführliche tabellarische Darstellung aller berechneten Metriken kann dem Anhang entnommen werden.

5 Ergebnisse

In einem ersten Schritt wurden die Berechnungen für die vier Luftschadstoffe Feinstaub PM_{10} , Feinstaub $PM_{2,5}$, Ozon und Stickstoffdioxid ausschließlich für Standorte von Luftmessstationen des Typs Hintergrund durchgeführt. Diese Stationen repräsentieren den ländlichen und städtischen Hintergrund und bilden die Hintergrundbelastung in einem weiteren Umkreis um die Messstation ab. Anschließend erfolgte für die Schadstoffe Feinstaub PM_{10} und $PM_{2,5}$ und für Stickstoffdioxid die Betrachtung der Immissionsbelastung an Luftmessstationen des Typs Verkehr, also an verkehrsnah messenden Luftmessstationen. Für Stickstoffdioxid war dabei eine Feiertags- und Wochentagskorrektur verbunden. Verkehrsnah messende Stationen unterliegen gewissen Schwankungen in der Schadstoffbelastung und sind deshalb nur lokal repräsentativ. Industrienah messende Stationen des Typs „Industrie“ flossen in die Berechnungen nicht mit ein.

Generell wurde für alle Luftschadstoffe ein Untersuchungszeitraum vom 03.01.2024 01:00 Uhr bis 31.12.2024 00:00 Uhr betrachtet. Dabei sollte ein Einfluss des Silvesterereignisses vollkommen ausgeschlossen werden. Für Feinstaub $PM_{2,5}$ und Stickstoffdioxid stellte sich heraus, dass die CAMS-Prognosedaten nur vom 15.02.2024 01:00 Uhr bis 31.12.2024 00:00 Uhr vorliegen. So wurde dieser Untersuchungszeitraum gewählt.

Besonders interessant ist das Modellverhalten während Episoden hoher Luftschadstoffkonzentration, um zu sehen, wie sich die Modellrechnungen zu den gemessenen Konzentrationen verhalten und ob auch bei höheren Konzentrationen die Prognosequalität gut bestimmbar ist. Für Feinstaub PM_{10} und $PM_{2,5}$ konnte eine Episode vom 15.03.2024 bis 15.04.2024 identifiziert werden. Die Ozonkonzentrationen erreichen höhere Werte bekanntlich von April bis September, daher wurde dieser 6-Monatszeitraum als Episode ausgesucht. Auf die Berechnung einer Episode für Stickstoffdioxid wurde verzichtet, da dieser Schadstoff weniger Konzentrationsepisoden aufweist.

5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Qualität der unkorrigierten und korrigierten Prognosewerte zeigt sich einerseits in den Metriken, die diese Modellwerte mit den Messwerten direkt vergleichen und andererseits in den statistischen Metriken, die eine Aussage darüber treffen, welche Modellwerte (unkorrigiert oder korrigiert) die gemessenen Schwellenwertüberschreitungen besser abbilden.

Ein wesentlicher Unterschied im direkten Vergleich mit den Messwerten zeigt sich bei den Maximalwerten der Modelle (MaxMod). Der Maximalwert des unkorrigierten CAMS-Modells liegt für alle Berechnungen bezüglich aller Luftschadstoffe deutlich unter dem entsprechenden maximalen Messwert und auch deutlich unter dem maximalen Wert der korrigierten Modellwerten. Die Korrektur erhöht also die Modellwerte, verringert damit die Unterschätzung der unkorrigierten CAMS-Prognosen und führt zu einer Annäherung an die Messwerte (MaxObs). Dies hat auch Einfluss auf den Mittelwert (MeanMod) der beiden Prognosen, der für die korrigierten Werte deutlich näher am gemessenen Mittelwert (MeanObs) liegt. Gleiches gilt für die Standardabweichung zwischen Modellwert und Messung und für die Korrelation.

Der BIAS als Maß für den systematischen Fehler zeigt für PM_{10} und NO_2 bei den korrigierten Modellwerten eine geringe Überschätzung (BIAS zwischen 0 und $1 \mu g/m^3$), während er bei den unkorrigierten Modellwerten eine Unterschätzung (bis $-10 \mu g/m^3$ für NO_2 verkehrsnah messend) liegt. Bei $PM_{2,5}$ und Ozon dagegen liegt der BIAS in beiden Modellwerten im

Positiven, was für eine Überschätzung spricht allerdings ist der BIAS für die korrigierten Prognosewerte durchgängig kleiner als der BIAS für die unkorrigierten.

Der Vergleich mit den Schwellenwerten führt zu einem ähnlichen Ergebnis, auch hier schneiden die korrigierten Prognosewerte besser ab als die unkorrigierten.

Grundsätzlich zeigt sich bei allen betrachteten Schwellenwertüberschreitungen eine deutlich höhere Hit Rate bei den Berechnungen mit korrigierten Prognosedaten gegenüber den nicht korrigierten. Dies bedeutet, die korrigierten Prognosewerte bilden die gemessenen Überschreitungen der entsprechenden Schwellenwerte deutlich besser ab als die unkorrigierten CAMS-Prognosen.

Insbesondere für Ozon (O_3) erreicht die Hit Rate sowohl für die Stundenmittelwerte (SMW) als auch für die höchsten 8-Stundenmittelwerte des Tages (8TMAX) Werte über 50%, das zeigt, über 50% der modellierten Schwellenwertüberschreitungen (hier maximal 69%) treffen die gemessenen Schwellenwertüberschreitungen korrekt, wobei auch bei den unkorrigierten Prognosewerten für Ozon die Hit Rate in der Betrachtung der Einstundenmittelwerte fast 44% erreicht. Für Ozon zeigt sich also die beste Annäherung der korrigierten aber auch der unkorrigierten Prognosewerte an die Messergebnisse.

Ähnlich gut und dabei mit größeren Abständen zwischen korrigierten und unkorrigierten Prognosewerten zeigen sich die Werte für die HitRate für $PM_{2,5}$. Allerdings liegt der Wert für die Episode (Zeitraum mit höheren Konzentrationen $PM_{2,5}$ in der Außenluft) nur bei rund 22%, während im Gesamtjahr für den städtischen Hintergrund 56% und für verkehrsnah messende Stationen 62% der gemessenen Überschreitungen der Schwellenwerte getroffen werden.

Damit lässt sich feststellen, dass für Ozon und $PM_{2,5}$ die korrigierten Prognosewerte die gemessenen Schwellenwertüberschreitungen am besten abbilden.

Die Ergebnisse für Feinstaub PM_{10} lassen sich, wie oben erwähnt, nur für den Schwellenwert von $35 \mu g/m^3$ bezüglich des gleitenden Tagesmittelwertes diskutieren, da es 2024 für die Betrachtung des Schwellenwert von $50 \mu g/m^3$ bezüglich des Tagesmittelwertes zu wenig Überschreitungen gab. Die HitRate der korrigierten Prognosewerten für die Berechnungen Gesamtjahr für den Hintergrund und für verkehrsbezogene Messtationen liegt etwa um Zweidrittel höher als für die Berechnungen der Episode. Hier scheinen längere Datenreihen aussagekräftigere Ergebnisse zu bringen. Auch ist der Unterschied zu den unkorrigierten Prognosewerten deutlich größer als bei Ozon oder $PM_{2,5}$.

Für Stickstoffdioxid werden zwei Schwellenwerte berücksichtigt (40 und $100 \mu g/m^3$). Die Hit Rate konnte nur für den Schwellenwert von $40 \mu g/m^3$ bestimmt werden (der Medianwert aller gemessenen Schwellenwertüberschreitungen bezüglich $100 \mu g/m^3$ ist gleich Null) und liegt für verkehrsnah messende Stationen bei den Berechnungen mit korrigierten Prognosedaten bei 56%, für städtische Hintergrundstationen nur bei 11%.

Aussagekräftig ist noch der CSI (Critical Success Index). Dieser Index charakterisiert den Anteil der korrekt vorhergesagten Schwellenwertüberschreitungen an der Gesamtheit der gemessenen und / oder modellierten Schwellenwertüberschreitungen. Je höher dieser Wert (max. 100%) umso besser werden die Schwellenwertüberschreitungen getroffen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Die Hit Rate ist höher bei:

- korrigierten Prognosedaten,
- verkehrsbezogenen Messungen,
- längeren Messreihen und
- den Luftschadstoffen Ozon und $PM_{2,5}$.

Für die Beurteilung der Luftqualität bezüglich Informations- und Alarmschwellen und anderer Vorhersagen ist die Verwendung der vom UBA korrigierten CAMS-Prognosen zu empfehlen und bietet im Vergleich zu den unkorrigierten CAMS-Prognosen eine deutlich bessere Annäherung an die gemessenen Werte.

Folgende Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen der Metriken zu allen Luftschadstoffen hinsichtlich der oben genannten Schwellenwerte. Dabei kennzeichnen zur besseren Visualisierung die gelben Markierungen die höchsten Werte je Metrik, die grünen Markierungen die nächst höchsten Werte.

Dargestellt ist der berechnete Median jeder Metrik über alle berücksichtigten Luftmessstationen für die korrigierten Prognosedaten (korr) und die unkorrigierten CAMS-Prognosedaten (nokorr).

Hinter der Schadstoffbezeichnung in der Spalte Schadstoff sind die zeitlichen und örtlichen Komponenten aufgeführt. Dabei steht „TMW“ für Tagesmittelwert, „TMWGL“ für gleitenden Tagesmittelwert, „SMW“ für Stundenmittelwert und „8TMAX“ für den höchsten 8-Stundenwert des Tages. „HG“ steht für Stationen des ländlichen und städtischen Hintergrundes, „V“ steht für verkehrsnah messende Stationen. Gesamtjahr (GJ) und Episode (E) bezeichnet die zeitliche Komponente der Berechnungen. Die abschließende Zahl entspricht dem oben genannten Schwellenwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Die Spalte MeasExc bezeichnet den Median der Anzahl der gemessenen Überschreitungen über alle berücksichtigten Luftmessstationen als Vergleichswert zu den berechneten Metriken.

Da es im Bezugsjahr insbesondere für PM_{10} im städtischen Hintergrund (HG) sehr wenige Überschreitungen des Schwellenwertes von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gab, sind die in der Tabelle aufgeführten Metriken hierfür nicht aussagekräftig. Im Kapitel 5.2. werden deshalb weitere Metriken bewertet.

Für die Überschreitungsschwelle für Ozon bezüglich des höchsten Einstundenmittelwertes des Tages von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ergaben die Berechnungen im Median keine Überschreitung und damit lagen alle Metriken der Tabelle 2 bei Null.

Durch Anwendung eines Zeitfensters mittels Variablen nRelax = 2 (Kapitel 4) wird der Akzeptanzbereich für eine Schwellenwertüberschreitung erweitert und die Metriken fallen höher aus. Dies wird in den Ergebnistabellen im Anhang des Berichtes abgebildet.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Ergebnisse

Schadstoff / Bezug	MeasExc	HitRate in %		FARate in %		HSS		CSI in %	
	Anzahl	Korr	Nokorr	Korr	Nokorr	korr	Nokorr	korr	Nokorr
PM_{10} TMW HG, GJ, SW 50	1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0,0	0.0
PM_{10} , TMW HG, E, SW 50	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PM_{10} , TMW, V, GJ, SW 50	2	25.0	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	14.3	0.0
PM_{10} TMWGL, HG, GJ, SW 35	126	42.6	0.0	1.2	0.3	0.4	0.00	23.8	0.0

PM ₁₀ , TMWGL, HG, E, SW 35	45	13.7	0.0	3.5	0.0	0.1	0.0	9.4	0.0
PM ₁₀ TMWGL, V, GJ, SW 35	230	47.3	1.7	2.0	0.4	0.4	0.0	28.5	1.7
PM _{2,5} , TMWGL, HG, GJ, SW 20	24	56.3	37.0	2.3	3.5	0.4	0.2	29.7	16.1
PM _{2,5} , TMWGL HG, E, SW 20	27	22.2	0.0	3.1	2.6	0.1	0.0	9.2	0.0
PM _{2,5} TMWGL, V, GJ, SW 20	349	62.6	39.0	3.0	3.3	0.5	0.3	38.2	20.3
NO ₂ SMW, HG, GJ, SW 40	17	11.4	0.0	1.4	0.2	0.0	0.0	1.9	0.0
NO ₂ SMW, HG, GJ, SW 100	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NO ₂ SMW, V, GJ, SW 40	483	56.3	3.0	16.5	0.7	0.2	0.0	16.2	2.5
NO ₂ SMW, V, GJ, SW 100	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
O ₃ SMW HG, GJ, SW 120	78	68.5	43.4	1.2	0.4	0.4	0.4	29.3	27.2
O ₃ SMW HG, E, SW 120	78	68.5	43.4	2.5	0.8	0.4	0.4	29.3	27.2
O ₃ 8TMAX HG, GJ, SW 120	8	53.1	27.0	0.9	0.3	0.5	0.4	37.2	23.1
O ₃ 8TMAX HG, E, SW 120	8	53.6	27.3	1.8	0.6	0.5	0.4	37.5	23.3

5.2 Evaluierung der CAMS-Prognose mit und ohne Korrektur für den Luftschadstoff Feinstaub PM₁₀

Die Metriken in den Tabelle 8 bis 13 im Anhang zeigen das Ergebnis der Berechnungen für den Untersuchungszeitraum Gesamtjahr und für die Episode für Hintergrundstationen und verkehrsnah messende Stationen bezogen auf die oben genannten Schwellenwerte.

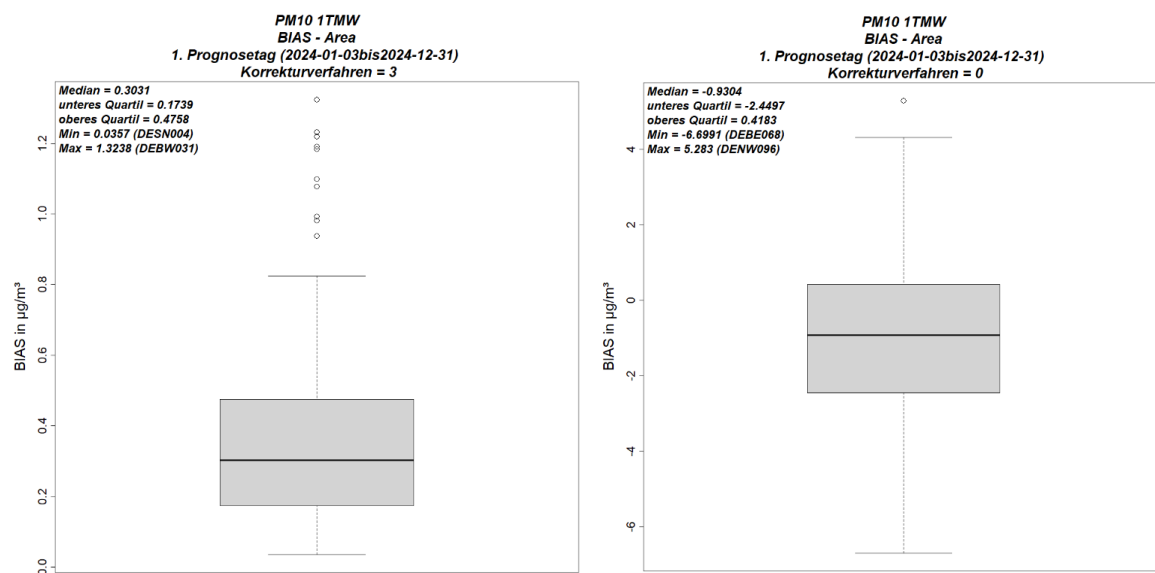
Grundsätzlich wurden 2024 im Mittel an den betrachteten Hintergrundmessstationen nur wenige Überschreitungen gemessen (MeasExc liegt bei 1,0), was eine Auswertung und Interpretation der entsprechenden Metriken für diese Schwellenwertüberschreitung erschwert.

Mittelwert, Standardabweichung, Maximalwert und Korrelation der korrigierten Prognosewerte für PM₁₀ weisen für die Berechnungen zum Tagesmittel und zum gleitenden Mittel geringere Differenzen zu den gleichen Metriken der gemessenen Werte auf als die unkorrigierten Prognosedaten. So liegt beispielsweise der MaxObs bei 53,4 µg/m³ und der MaxMod (korrigiert) für die Ganzjahresberechnung und den Hintergrund bei 54,1 µg/m³, unkorrigiert nur bei 36,4 µg/m³.

Der Bias als Metrik für den systematischen Fehler des Modells zeigt für die unkorrigierten Modellwerte im Vergleich zu den Messdaten mit -0,9 µg/m³ (TMW Hintergrund, Ganzjahresberechnung) bis -3,5 µg/m³ (TMW verkehrsbezogen, Ganzjahresberechnung) eine mehr oder weniger ausgeprägte systematische Unterschätzung. Für die korrigierten Prognosewerte liegt der Bias für alle Berechnungen im positiven Bereich mit dem Maximalwert von 0,3 µg/m³ für den Tagesmittelwert im Hintergrund (Ganzjahresberechnung) und zeigt damit eine leichte Überschätzung im Vergleich zu den gemessenen Werten.

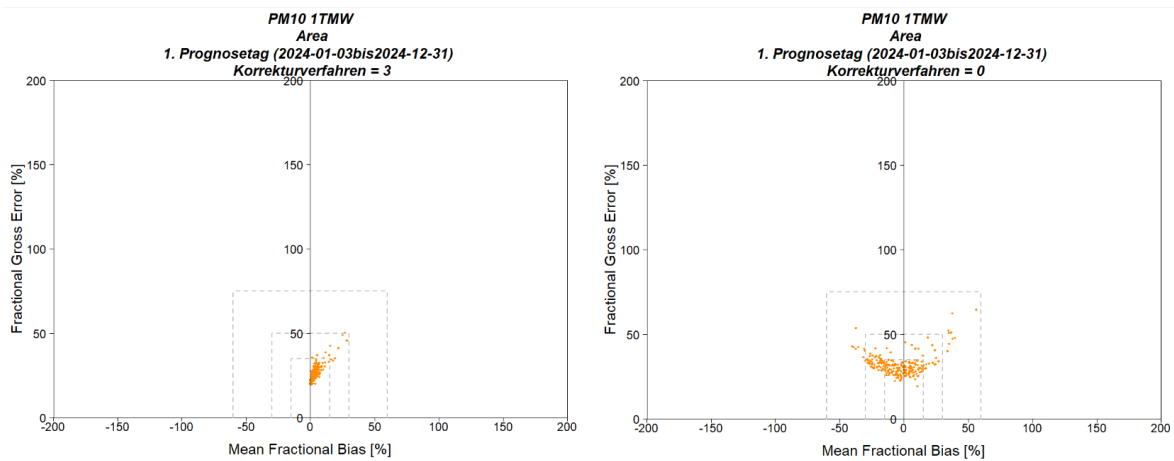
In der Abbildung 1 ist für beide Berechnungen (links korrigiert, rechts unkorrigiert) der Bias grafisch dargestellt. Dabei ist die unterschiedliche Skalierung zu beachten.

Abbildung 1: Bias bezogen auf den PM₁₀, Tagesmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr



Folgender Soccerplot (Abbildung 2) zeigt für die Tagesmittelwerte beispielhaft die Fehler in den Berechnungen sowohl für die korrigierten (links) und unkorrigierten (rechts) Prognosewerte. Dabei stellt jeder Punkt den Fractional Gross Error und den Mean Fractional Bias für eine betrachtete Luftmessstation dar. Der Soccerplot trägt den Fractional Gross Error (FGE in %) und den Mean Fractional Bias (MFB in %) auf und zeigt besonders für die unkorrigierten Werte eine deutliche Streuung. Dies spricht für zufällige Fehler im Modell und einer gleichzeitig ausgeprägten Über- und Unterschätzung während für die korrigierten Prognosewerte eine leichte Überschätzung und weniger ausgeprägte systematische Fehler zu erkennen sind.

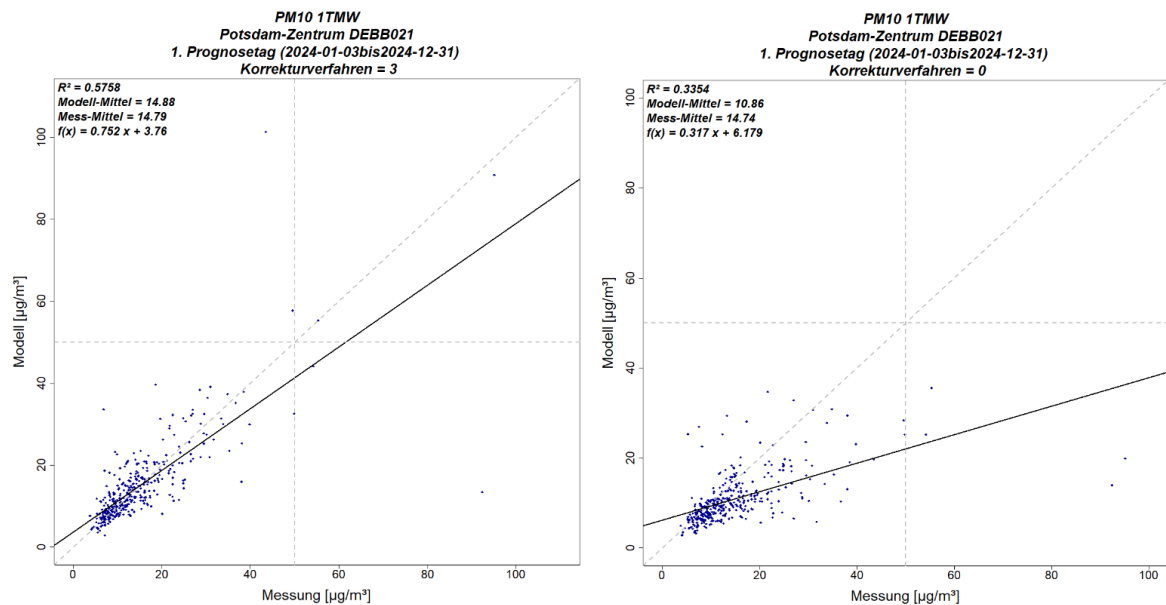
Abbildung 2: Soccerplot bezogen auf PM₁₀, Tagesmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr



Beispielhaft zeigt die folgende Abbildung (Abbildung 3) den Scatterplot für den Tagesmittelwert für PM₁₀ für eine zufällig ausgewählte Station.

Die Mess- und die Modellergebnisse werden in diesem Diagramm gegeneinander aufgetragen. Für die korrigierten Prognosewerte (links) zeigt sich eine bessere Übereinstimmung beider Datenreihen mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,58, einem fast gleichen Mittelwert (14,9 zu 14,8) und einer deutlich besseren Steigung als in der rechten Abbildung für die unkorrigierten Prognosewerte.

Abbildung 3: Scatterplot für PM₁₀, Tagesmittelwert, Station DEBB021, Gesamtjahr



Die Ergebnisse für Feinstaub PM₁₀ lassen sich, wie oben erwähnt, nur für den Schwellenwert von 35 µg/m³ bezüglich des gleitenden Tagesmittelwertes diskutieren, da es 2024 für die Betrachtung des Schwellenwert von 50 µg/m³ bezüglich des Tagesmittelwertes zu wenig Überschreitungen gab. Die Hit Rate für den Hintergrund und für verkehrsbezogene Messtationen liegt etwa Zweidrittel höher als für die Berechnungen der Episode. Hier scheinen längere Datenreihen aussagekräftigere Ergebnisse zu bringen. Auch ist der Unterschied zu den unkorrigierten Prognosewerten deutlich größer als bei Ozon oder PM_{2,5}.

Tabelle 3 zeigt die entsprechenden Ergebnisse hinsichtlich der Schwellenwerte.

5.3 Evaluierung der CAMS-Prognose mit und ohne Korrektur für den Luftschadstoff Feinstaub PM_{2,5}

Die Metriken in den Tabelle 14 bis 16 im Anhang zeigen das Ergebnis der Berechnungen für den Untersuchungszeitraum Gesamtjahr und für die Episode sowie für Hintergrundstationen und verkehrsnah messende Stationen bezogen auf den oben genannten Schwellenwert von 20 µg/m³.

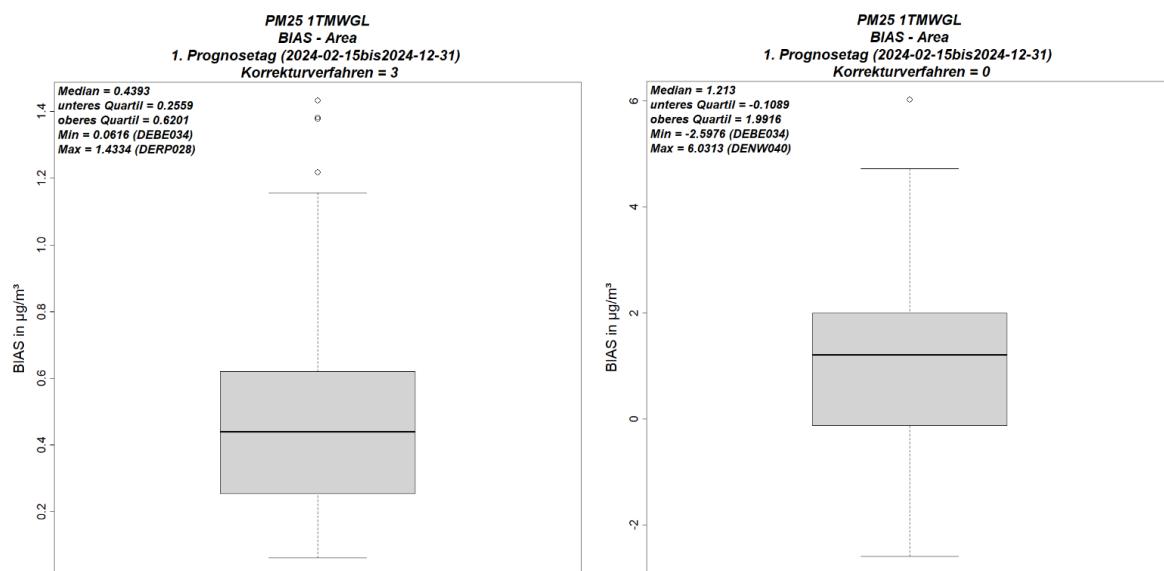
Grundsätzlich weichen die berechneten Metriken für PM_{2,5} hinsichtlich der unkorrigierten und korrigierten Prognosewerte nicht so deutlich voneinander ab wie für PM₁₀ oder NO₂.

Der Maximalwert (MaxMod) bezogen auf das Gesamtjahr und den Hintergrund beträgt korrigiert 37,5 µg/m³ und unkorrigiert 31,4 µg/m³. Auch Mittelwert, Standardabweichung und Korrelation liegen für die Jahresberechnung Hintergrund und Verkehr und für die Episodenberechnung im Hintergrund nah an den Metriken der gemessenen Werte aber auch nah beieinander.

Der Bias ist für alle drei Fälle sowohl korrigiert als auch unkorrigiert im positiven Bereich und bei den unkorrigierten Prognosewerten mit durchschnittlich 1,0 µg/m³ leicht höher als bei den korrigierten Werten mit durchschnittlich 0,5 µg/m³.

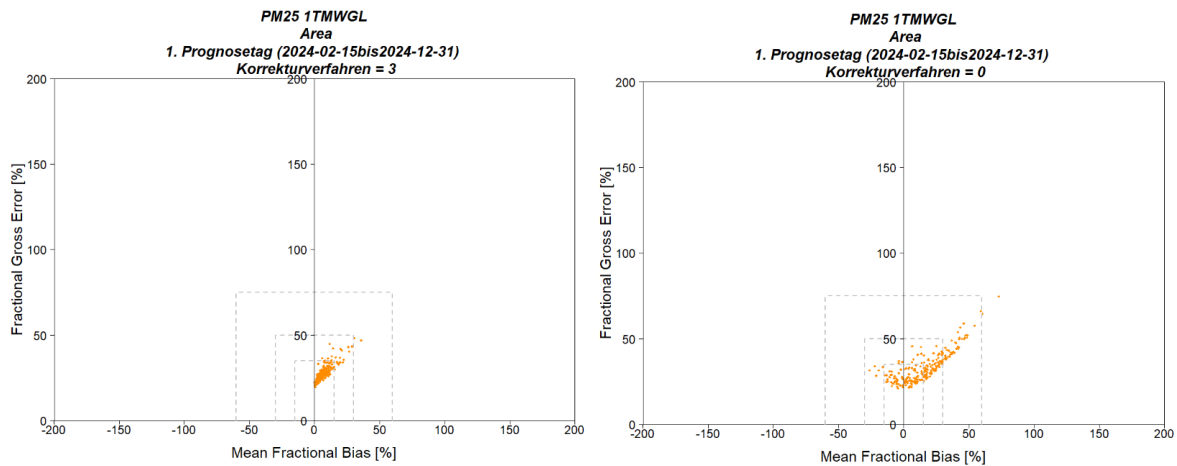
In der Abbildung 4 ist für beide Berechnungen (links korrigiert, rechts unkorrigiert) der Bias grafisch dargestellt. Dabei ist die unterschiedliche Skalierung zu beachten. Der Median der abgebildeten Ergebnisse für den TMWGL im Hintergrund ist für die unkorrigierten Prognosewerte höher als für die korrigierten, allerdings mit einer größeren Differenz zwischen dem jeweiligen Min- und Max-Wert.

Abbildung 4: Bias für PM_{2,5} gleitenden Tagesmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr



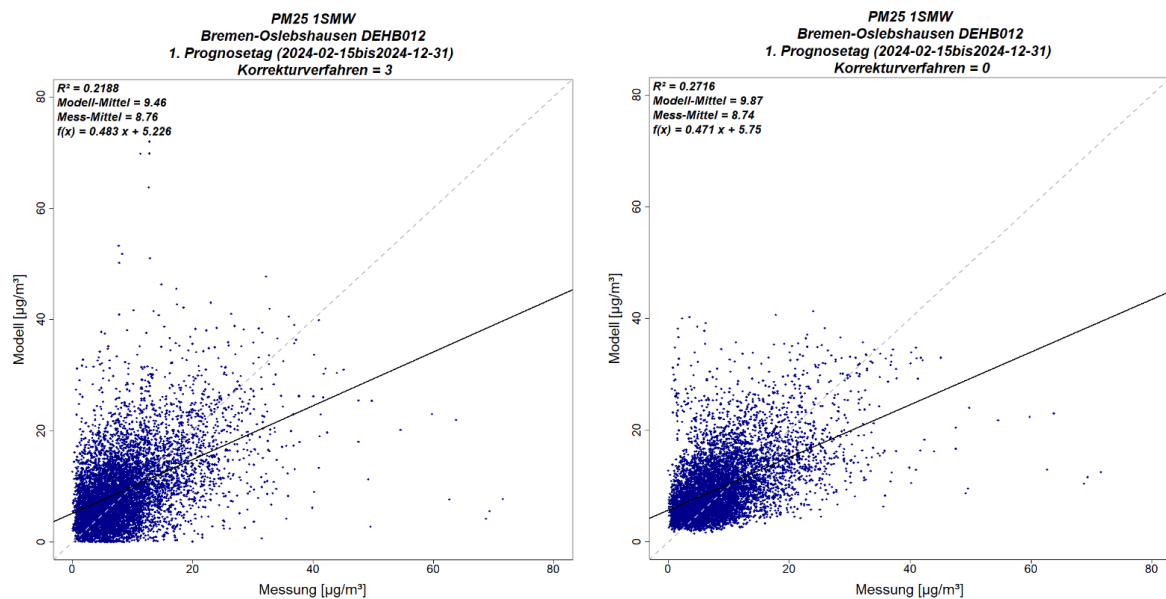
Folgender Soccerplot (Abbildung 5) zeigt für die gleitenden Tagesmittelwerte (Ganzjahresberechnung, Hintergrund) beispielhaft die Fehler in den Berechnungen sowohl für die korrigierten (links) und unkorrigierten (rechts) Modellwerte. Der Soccerplot trägt den Fractional Gross Error (FGE in %) und den Mean Fractional Bias (MFB in %) auf und zeigt für die unkorrigierten Werte eine leichte Streuung. Dies spricht für zufällige Fehler im Modell und einer klaren Über- und leichten Unterschätzung während für die korrigierten Prognosewerte eine leichte Überschätzung und eher systematische Fehler zu erkennen sind. Die Unterschiede zwischen der korrigierten und der unkorrigierten Vorhersage sind nicht so ausgeprägt wie bei PM₁₀.

Abbildung 5: Soccerplot PM_{2,5} gleitenden Tagesmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr



Der folgende Scatterplot (Abbildung 6) einer zufällig ausgewählten Station bezieht sich auf Stundenmittelwerte für PM_{2,5} im Hintergrund. Modell und Messwerte gegenseitig aufgetragen ergeben unterschiedliche Diagramme für die korrigierten (links) und unkorrigierten Prognosewerte (rechts). Beide Diagramme unterscheiden sich nur marginal im Bestimmtheitsmaß, in den Mittelwerten und in der Steigung.

Abbildung 6: Scatterplot für PM_{2,5} Einstundenmittelwerte, Hintergrund, Station DEHB012, Gesamtjahr



Die Hit Rate für PM_{2,5}, dargestellt in [Tabelle 3](#), erreicht für die Berechnung des Gesamtjahres mit korrigierten Prognosewerten bezüglich des Schwellenwertes von 20 µg/m³ sehr hohe Werte und zeigt dabei größere Abstände zwischen korrigierten und unkorrigierten Prognosewerten. Allerdings liegt der Wert für die Episode (Zeitraum mit höheren Konzentrationen) nur bei rund 22% statt 56% für den städtischen Hintergrund und 62% für verkehrsnah messende Stationen (beides Gesamtjahr).

Damit lässt sich feststellen, dass für PM_{2,5} die korrigierten Prognosewerte die gemessenen Schwellenwertüberschreitungen besser abbilden als für PM₁₀.

5.4 Evaluierung der CAMS-Prognose mit und ohne Korrektur für den Luftschadstoff Ozon

Ähnlich wie bei den anderen betrachteten Schadstoffen liegen die Metriken MaxMod, SMod und MeanMod für die korrigierten Prognosewerte deutlich näher an den entsprechenden Metriken der gemessenen Werte als für die unkorrigierten. Insbesondere für die Berechnung der Episode unterscheiden sich die beiden MaxMod (korrigiert und unkorrigiert) um 10% voneinander.

Die Berechnungen für den Luftschadstoff Ozon beziehen sich auf unterschiedliche Schwellenwerte mit unterschiedlichen Zeitbezügen:

- Ozon, Einstundenmittelwert: $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$,
- Ozon, maximaler Einstundenmittelwert des Tages: $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Informationsschwelle) und $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Alarmschwelle),
- Ozon, maximaler Achtstundenmittelwert des Tages: $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$,

Die Berechnungen erfolgten ausschließlich für das Jahr 2024 und für die Episode von April bis einschließlich September 2024.

Die Ergebnisse finden sich in den Tabellen 19 bis 24 im Anhang.

Es ergaben sich für alle drei betrachteten Schwellenwerte sowohl für die Ganzjahresberechnung als auch für die Episodenberechnung geringere Differenzen für die einzelnen statistischen Metriken im Vergleich zwischen korrigierten und unkorrigierten Prognosewerten. Dies spricht für einen geringen Unterschied in der Modellqualität zwischen den unkorrigierten (also originalen) und den korrigierten CAMS-Prognosewerten.

Auch bei Ozon zeigt der Bias für die unkorrigierten Prognosedaten eine Unterschätzung (am deutlichsten bei 1TMAX von $-3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), während er bei den korrigierten Prognosewerten durchgängig positiv (maximal 1TMAX von $2,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) bleibt.

Auffällig sind die Ergebnisse für den Bias bezogen auf die Auswertung der Einstundenmittelwerte (SMW) und für den 8TMAX (Gesamtjahr). Hier ist für beide Berechnungen der Bias positiv und dabei höher für die unkorrigierten Prognosewerte (Beispiel: SMW für die Berechnung des Gesamtjahres $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (korrigiert) zu $4,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (unkorrigiert)).

Im Folgenden ist der Bias einmal für die höchsten Einstundenmittelwerte des Tages (korrigiert links und unkorrigiert rechts) und ebenso für den Einstundenmittelwert dargestellt.

Abbildung 7: Bias für Ozon, 1TMAX, Hintergrund, Gesamtjahr

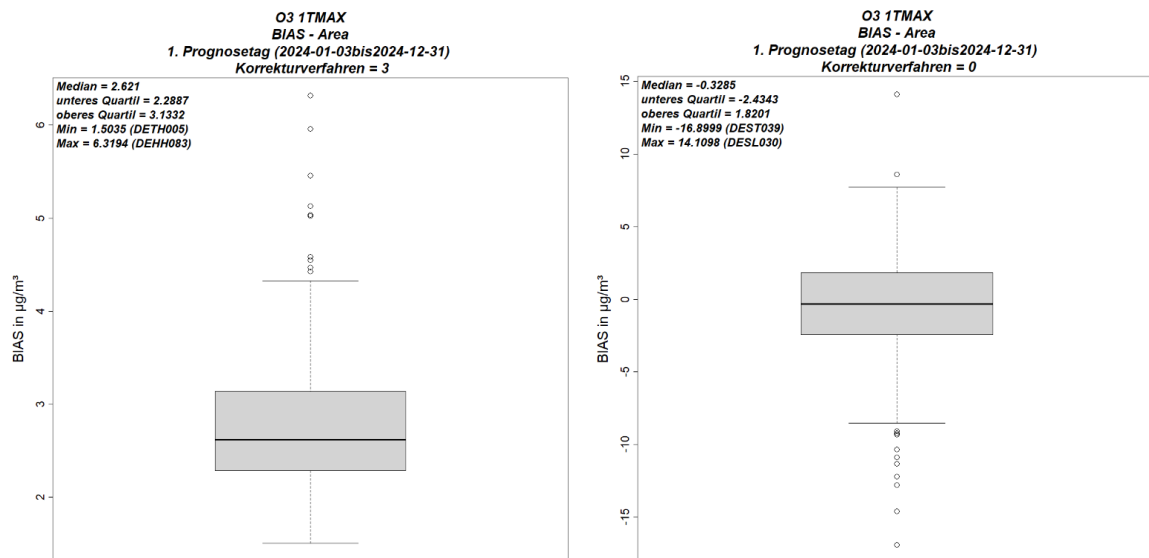
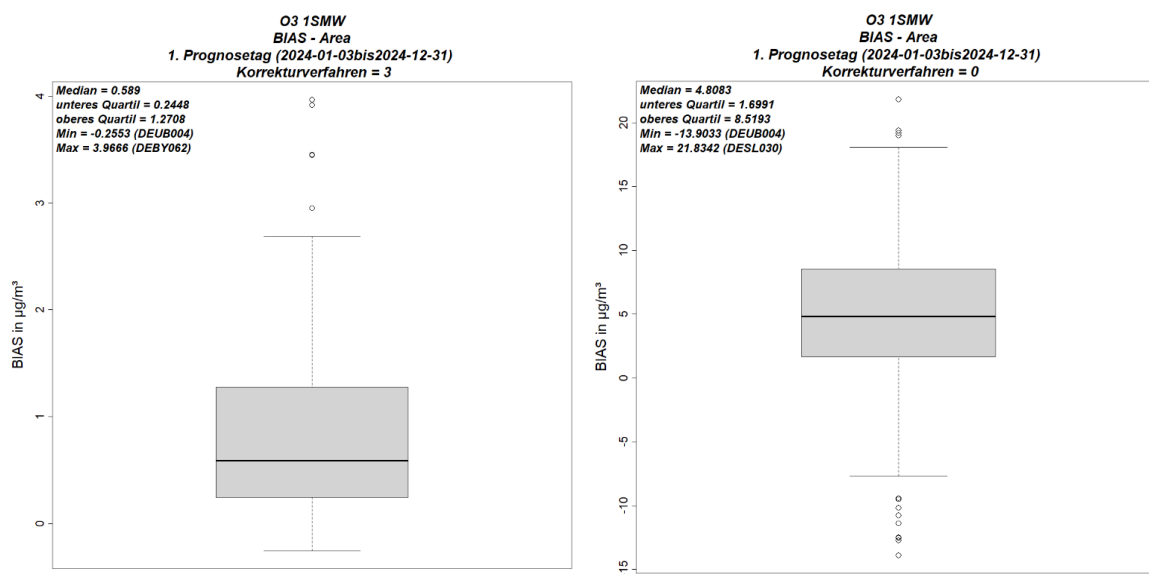
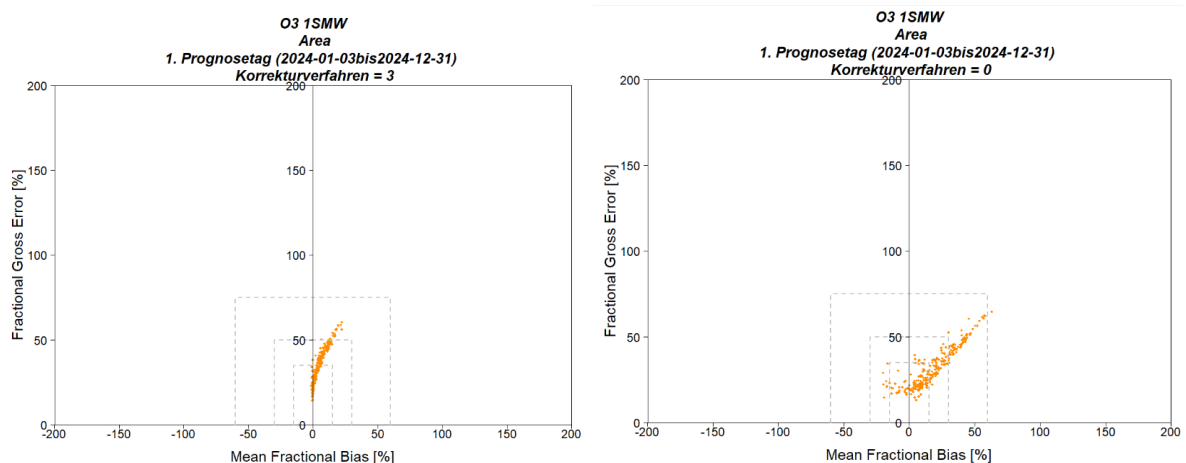


Abbildung 8: Bias für Ozon, SMW, Hintergrund, Gesamtjahr



Die Soccerplots für Ozon in Abbildung 9 sind für die unterschiedlichen Zeitbezüge (1SMW, 1TMAX und 8TMAX) sehr ähnlich. Folgender Soccerplot zeigt für die Einstundenmittelwerte beispielhaft die Fehler in den Berechnungen sowohl für die korrigierten (links) und unkorrigierten (rechts) Prognosewerte. Ähnlich wie bei Feinstaub $PM_{2,5}$ überwiegen hier systematische Fehler, ablesbar an der geringen Streuung der Punktwolken, und eine Überschätzung in beiden Modelldatensätzen.

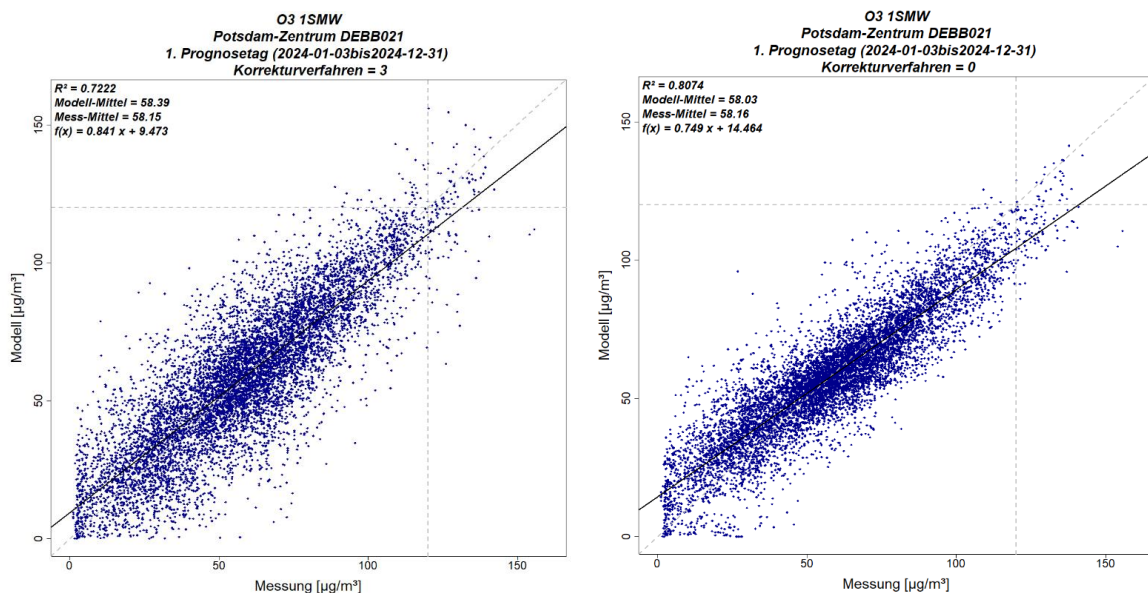
Abbildung 9: Soccerplot für Ozon, Einstundenmittelwerte, Hintergrund, Gesamtjahr



Der folgende Scatterplot (Abbildung 10) einer zufällig ausgewählten Station bestätigt die Aussagen, dass zwischen den Ergebnissen der Berechnungen mit korrigierten und unkorrigierten Prognosewerten für Ozon weniger Unterschiede als bei anderen Luftschadstoffen bestehen.

Die Abbildungen ähneln sich, auch das Bestimmtheitsmaß und die Werte für das Modell-Mittel im Vergleich zu den Mess-Mittel sind fast identisch.

Abbildung 10: Scatterplot für Ozon, Einstundenmittelwerte, Station DEBB021, Gesamtjahr



Eine hohe HitRate (bis zu 68%) und eine geringe FARate (maximal 2,468%) bezüglich der betrachteten Schwellenwerte kennzeichnen die Ergebnisse der Berechnungen mit korrigierten Prognosewerten für Ozon (Tabelle 3). Somit werden Zweidrittel der gemessenen Überschreitungen abgebildet.

Aber auch die Berechnungen mit unkorrigierten Prognosewerten zeigen eine relativ hohe HitRate (43,396 %) und damit eine gute Trefferquote. Knapp die Hälfte der gemessenen Schwellenwertüberschreitungen werden bereits mit unkorrigierten Prognosewerten abgebildet.

Für die Überschreitungsschwellen bezüglich des höchsten Einstundenmittelwertes des Tages von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ergaben die Berechnungen im Median keine Überschreitung und damit lagen alle Metriken bei Null (siehe Tabelle 20 und 21 im Anhang).

Grundsätzlich treffen sowohl die korrigierten als auch die nichtkorrigierten Prognosen die Überschreitung der Schwellenwerte gut, dennoch liegen die entsprechenden Metriken bei den korrigierten Prognosen höher als bei den unkorrigierten.

Auch die Metriken im direkten Vergleich zu den Messwerten (z.B. MaxMod) sprechen für eine bessere Modelqualität der korrigierten Prognose.

5.5 Evaluierung der CAMS-Prognose mit und ohne Korrektur für den Luftschadstoff Stickstoffdioxid

Die Metriken in den Tabelle 17 und 18 im Anhang zeigen das Ergebnis der Berechnungen für den Untersuchungszeitraum 2024 Gesamtjahr und für verkehrsnah messende Stationen bezogen auf den Schwellenwert zum Einstundenmittelwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Die Berechnungen zu einem weiteren Schwellenwert von $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ergaben keine Ergebnisse, da der Median über alle betrachteten Luftmessstationen (MeasExc100) keine gemessenen Überschreitungen zeigt.

Für Stickstoffdioxid konnten zwei Berechnungen durchgeführt werden, eine Berechnung mit Jahresdaten von Luftmessstationen im Hintergrund und eine Berechnung mit Jahresmessdaten von verkehrsnah messenden Luftmessstationen. Bei letzterer kam zusätzlich zu der Hybrid-Vorhersage noch eine Wochentags- und Feiertagskorrektur zum Einsatz.

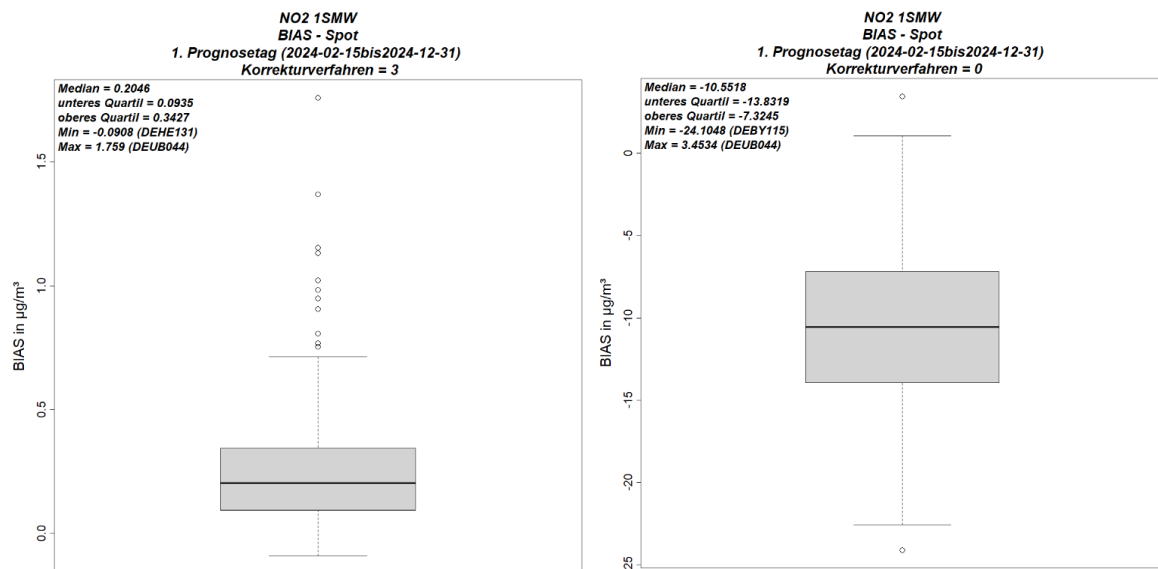
Der Maximalwert für die Prognosewerte (MaxMod) in beiden Berechnungen überschreitet für die korrigierten Prognosewerte den gemessenen MaxMod leicht, während der MaxMod der unkorrigierten Prognose diesen deutlich unterschreitet. Dabei ist die Differenz des MaxMod zwischen den beiden Modelldatensätzen etwas höher als bei Ozon, aber vergleichbar mit PM_{10} .

Gleiches gilt für die Metriken SDMod und MeanMod.

Der Bias zeigt für den Hintergrund eine leichte Unterschätzung gegenüber der Messung hinsichtlich der unkorrigierten Prognosedaten ($-0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und eine ebenso leichte Überschätzung hinsichtlich der korrigierten Prognosedaten ($0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Für die Berechnungen mit den verkehrsnah messenden Luftmessstationen ergibt sich eine deutliche Unterschätzung der unkorrigierten Prognosedaten gegenüber den Messungen von $-10,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und eine eher leichte Überschätzung der unkorrigierten Prognosedaten gegenüber den Messungen von $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

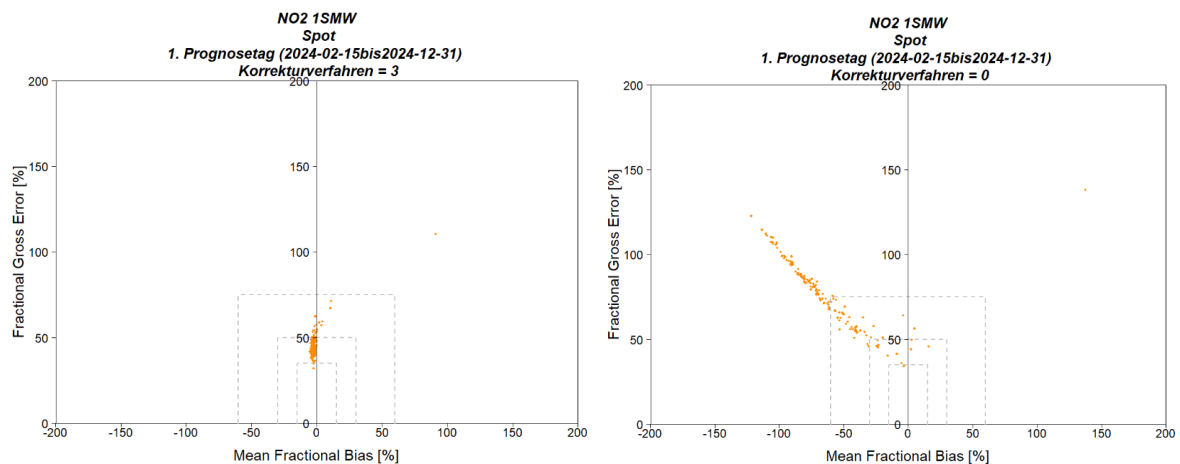
In der folgenden Abbildung 11 wird der Bias beispielhaft für die Einstundenmittelwerte an verkehrsnah messenden Stationen (Gesamtjahr) dargestellt. Der Bias unterscheidet sich sowohl im Median als auch in den Minimalwerten signifikant.

Abbildung 11: Bias für NO₂, Einstundenmittelwerte, Verkehr, Gesamtjahr



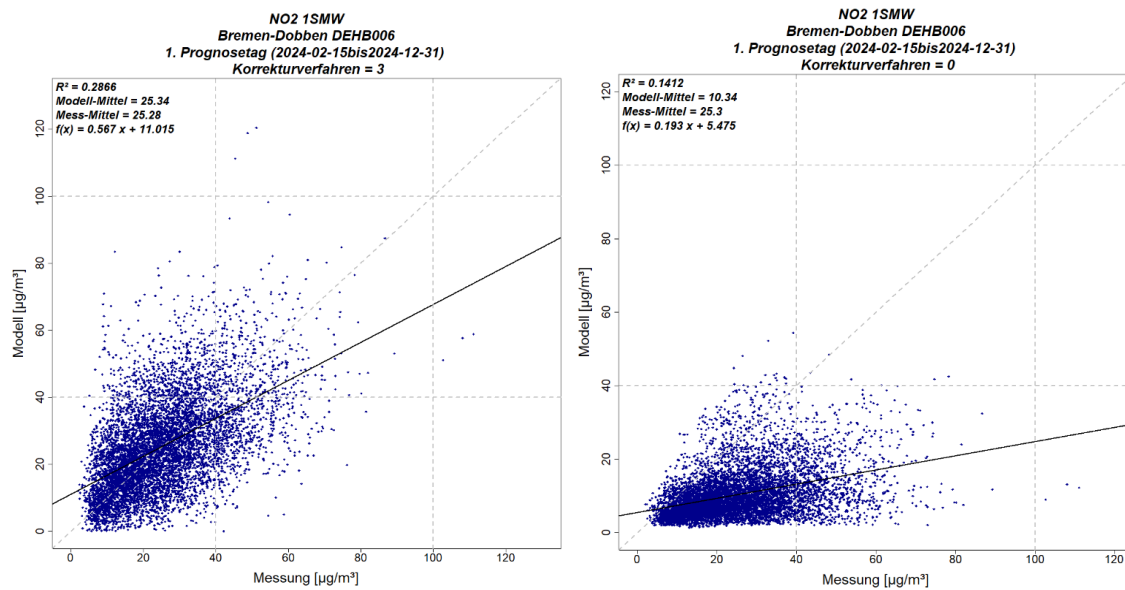
Der Soccerplot in der Abbildung 12 trägt den Fractional Gross Error (FGE in %) und den Mean Fractional Bias (MFB in %) auf und zeigt besonders für die unkorrigierten Werte ein negatives Bias mit wenig Streuung. Dies spricht für systematische Fehler im Modell und einer gleichzeitig ausgeprägten Unterschätzung während für die korrigierten Prognosewerte im Mittel eine leichte Überschätzung zu erkennen ist.

Abbildung 12: Soccerplot für NO₂, Einstundenmittelwerte, Verkehr, Gesamtjahr



Der folgende Scatterplot (Abbildung 13) einer zufällig ausgewählten verkehrsnah messenden Luftmessstation zeigt insbesondere für die unkorrigierten Prognosewerte die bereits ausgewertete deutliche Unterschätzung der Modellwerte bezüglich der gemessenen Werte. Durch die Korrektur konnte die Qualität der Modellwerte gegenüber den Messwerten deutlich verbessert werden, was sich sowohl an dem etwas höheren Bestimmtheitsmaß R^2 als auch den Mittelwerten für Modell und Messung erkennen lässt.

Abbildung 13: Scatterplot für NO₂, Einstundenmittelwerte, Station DEHB006, Gesamtjahr



Für Stickstoffdioxid werden zwei Schwellenwerte berücksichtigt (40 und 100 µg/m³). Die Hit Rate konnte nur für den Schwellenwert von 40 µg/m³ bestimmt werden und liegt für verkehrsnah messende Stationen bei den Berechnungen mit korrigierten Prognosedaten bei über 56%, für städtische Hintergrundstationen nur bei etwa 11%. An verkehrsnah messenden Stationen kann das korrigierte Modell demnach 56% der Überschreitungen korrekt vorhersagen. Dies ist in der Modellqualität vergleichbar mit den Werten für die Hit Rate für die Ganzjahresberechnungen (Hintergrund und verkehrsnah) für PM_{2,5}.

Der Unterschied zwischen der Hit Rate mit korrigierten Prognosewerten und nicht unkorrigierten Prognosewerten ist deutlich erkennbar und bestätigt, dass die Korrektur die Qualität des Modells hinsichtlich Stickstoffdioxid signifikant verbessert (siehe [Tabelle 3](#)).

6 Anhang Ergebnistabellen

Ergebnistabellen für alle Luftschadstoffe mit allen berechneten Metriken (Angaben in $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tabelle 4: Metriken PM₁₀ Tagesmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr, Schwellenwert 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

	Metriken PM ₁₀ korrigiert, Bezug Gesamtjahr	Metriken PM ₁₀ unkorrigiert, Bezug Gesamtjahr
MinObs	2.5	2.4
MinMod	2.6	2.5
MeanObs	12.8	12.8
MeanMod	13.1	11.2
MaxObs	53.4	53.7
MaxMod	54.1	36.4
SDObs	7.4	7.4
SDMod	7.4	5.6
Cor	0.7	0.6
RMSE	5.5	6.4
Bias	0.3	-0.9
MFB	2.9	-3.7
FGE	26.0	30.9
MeasExc	1.0	1.0
HitRate	0.0	0.0
FARate	0.3	0.0
HSS	0.0	0.0
CSI	0.0	0.0
BiasRatio	0.5	0.0

Tabelle 5: Metriken PM₁₀ Tagesmittelwert, Hintergrund, Episode, Schwellenwert 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

	Metriken PM ₁₀ korrigiert, Bezug Episode	Metriken PM ₁₀ unkorrigiert, Bezug Episode
MinObs	3.9	3.8
MinMod	4.0	5.3
MeanObs	14.5	14.4
MeanMod	14.9	12.0
MaxObs	49.4	49.6
MaxMod	44.2	27.3
SDObs	10.9	10.8
SDMod	9.6	5.3
Cor	0.6	0.6
RMSE	9.5	8.8
BIAS	0.2	-2.0
MFB	4.6	0.9
FGE	30.1	30.1
MeasExc	0.0	0.0

HitRate	0.0	0.0
FARate	0.0	0.0
HSS	0.0	0.0
CSI	0.0	0.0
BiasRatio	0.0	0.0

Tabelle 6: Metriken PM₁₀ Tagesmittelwert, Verkehr, Gesamtjahr, Schwellenwert 50 µg/m³

	Metriken PM ₁₀ korrigiert, Bezug Gesamtjahr	Metriken PM ₁₀ unkorrigiert, Bezug Gesamtjahr
MinObs	3.4	3.4
MinMod	3.6	2.7
MeanObs	15.6	15.5
MeanMod	15.9	11.7
MaxObs	61.0	61.0
MaxMod	64.1	37.3
SDObs	8.3	8.3
SDMod	8.3	5.8
Cor	0.7	0.6
RMSE	6.1	8.0
Bias	0.2	-3.6
MFB	1.4	-24.3
FGE	23.8	32.2
MeasExc	2.0	2.0
HitRate	25.0	0.0
FARate	0.3	0.0
HSS	0.2	0.0
CSI	14.3	0.0
BiasRatio	0.8	0.0

Tabelle 7: Metriken PM₁₀ gleitender Tagesmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr, Schwellenwert 35 µg/m³

	Metriken PM ₁₀ korrigiert, Bezug Gesamtjahr	Metriken PM ₁₀ unkorrigiert, Bezug Gesamtjahr
MinObs	2.1	2.1
MinMod	2.2	2.3
MeanObs	12.8	12.8
MeanMod	13.1	11.1
MaxObs	61.2	61.7
MaxMod	61.2	37.7
SDObs	7.6	7.6
SDMod	7.4	5.6
Cor	0.7	0.6
RMSE	5.6	6.6
BIAS	0.3	-0.9

MFB	3.0	-3.5
FGE	25.9	31.1
MeasExc	126.0	126.0
HitRate	36.8	0.0
FARate	1.0	0.2
HSS	0.4	0.0
CSI	22.7	0.0
BiasRatio	1.0	0.2
HitRateW	42.6	0.0
FARateW	1.2	0.3
HSSW	0.4	0.0
CSIW	23.8	0.0
BiasRatioW	1.1	0.2

Tabelle 8: Metriken PM₁₀ gleitender Tagesmittelwert, Hintergrund, Episode, Schwellenwert 35 µg/m³

	Metriken PM ₁₀ korrigiert, Bezug Episode	Metriken PM ₁₀ unkorrigiert, Bezug Episode
MinObs	3.4	3.4
MinMod	3.3	4.8
MeanObs	14.6	14.5
MeanMod	14.9	12.0
MaxObs	60.5	61.3
MaxMod	52.6	29.5
SDObs	11.0	11.4
SDMod	9.8	5.4
Cor	0.6	0.6
RMSE	10.5	9.1
Bias	0.2	-2.1
MFB	4.7	0.8
FGE	31.7	30.4
MeasExc	45.0	45.0
HitRate	15.7	0.0
FARate	3.2	0.0
HSS	0.1	0.0
CSI	9.4	0.0
BiasRatio	0.8	0.0
HitRateW	13.7	0.0
FARateW	3.5	0.0
HSSW	0.1	0.0
CSIW	9.4	0.0
BiasRatioW	0.8	0.0

Tabelle 9: Metriken PM₁₀ gleitendes Tagesmittelwert, Verkehr, Gesamtjahr, Schwellenwert 35 µg/m³

	Metriken PM ₁₀ korrigiert, Bezug Gesamtjahr	Metriken PM ₁₀ unkorrigiert, Bezug Gesamtjahr
MinObs	3.1	3.0
MinMod	3.1	2.5
MeanObs	15.6	15.5
MeanMod	15.9	11.7
MaxObs	76.6	76.6
MaxMod	76.3	40.0
SDObs	8.4	8.4
SDMod	8.3	5.8
Cor	0.7	0.6
RMSE	6.2	8.0
Bias	0.2	-3.6
MFB	1.6	-24.2
FGE	23.6	33.2
MeasExc	230.0	230.0
HitRate	43.9	0.9
FARate	1.7	0.3
HSS	0.4	0.0
CSI	27.4	0.9
BiasRatio	1.0	0.2
HitRateW	47.3	1.7
FARateW	2.0	0.4
HSSW	0.4	0.0
CSIW	28.5	1.7
BiasRatioW	1.2	0.2

Tabelle 10: Metriken PM_{2,5} gleitendes Tagesmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr, Schwellenwert 20 µg/m³

	Metriken PM _{2,5} korrigiert, Bezug Gesamtjahr	Metriken PM _{2,5} unkorrigiert, Bezug Gesamtjahr
MinObs	1.5	1.5
MinMod	1.3	1.7
MeanObs	7.9	7.9
MeanMod	8.3	8.6
MaxObs	35.9	36.1
MaxMod	37.5	31.4
SDObs	5.0	5.0
SDMod	5.1	5.0
Cor	0.8	0.7
RMSE	3.4	4.4
Bias	0.4	1.2

MFB	5.8	15.6
FGE	26.8	31.5
MeasExc	242.5	242.5
HitRate	51.5	34.0
FARate	1.9	3.1
HSS	0.4	0.2
CSI	30.3	15.9
BiasRatio	1.1	1.5
HitRateW	56.3	37.0
FARateW	2.3	3.5
HSSW	0.4	0.2
CSIW	29.7	16.1
BiasRatioW	1.3	1.6

Tabelle 11: Metriken PM_{2,5} gleitendes Tagesmittelwert, Hintergrund, Episode, Schwellenwert 20 µg/m³

	Metriken PM _{2,5} korrigiert, Bezug Episode	Metriken PM _{2,5} unkorrigiert, Bezug Episode
MinObs	2.0	2.0
MinMod	1.9	3.1
MeanObs	7.9	7.8
MeanMod	8.6	9.2
MaxObs	29.7	30.3
MaxMod	28.3	22.1
SDObs	5.4	5.4
SDMod	5.4	4.2
Cor	0.6	0.5
RMSE	4.9	5.9
Bias	0.6	1.5
MFB	9.9	25.6
FGE	32.4	41.4
MeasExc	27.0	27.0
HitRate	19.4	0.0
FARate	2.7	2.2
HSS	0.1	0.0
CSI	8.9	0.0
BiasRatio	0.9	0.0
HitRateW	22.2	0.0
FARateW	3.1	2.6
HSSW	0.1	0.0
CSIW	9.2	0.0
BiasRatioW	1.0	0.0

Tabelle 12: Metriken PM_{2,5} gleitendes Tagesmittelwert, Verkehr, Gesamtjahr, Schwellenwert 20 µg/m³

	Metriken PM _{2,5} korrigiert, Bezug Gesamtjahr	Metriken PM _{2,5} unkorrigiert, Bezug Gesamtjahr
MinObs	1.8	1.8
MinMod	1.6	1.8
MeanObs	8.9	8.9
MeanMod	9.2	9.1
MaxObs	37.8	37.8
MaxMod	39.4	32.6
SDObs	5.4	5.4
SDMod	5.5	5.1
Cor	0.8	0.7
RMSE	3.6	4.4
Bias	0.3	0.4
MFB	3.6	6.0
FGE	24.7	27.7
MeasExc	348.5	348.5
HitRate	56.1	35.7
FARate	2.6	3.0
HSS	0.5	0.3
CSI	37.1	20.2
BiasRatio	1.1	1.1
HitRateW	62.6	39.0
FARateW	3.0	3.3
HSSW	0.5	0.3
CSIW	38.2	20.3
BiasRatioW	1.2	1.2

Tabelle 13: Metriken NO₂ Einstundenmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr, Schwellenwert 40 µg/m³ und 100 µg/m³

	Metriken NO ₂ korrigiert, Bezug Gesamtjahr	Metriken NO ₂ korrigiert Bezug, Gesamtjahr
MinObs	1.0	1.0
MinMod	0.0	0.8
MeanObs	9.4	9.4
MeanMod	10.0	7.5
MaxObs	56.2	56.2
MaxMod	61.1	45.0
SDObs	6.7	6.7
SDMod	7.3	5.7
Cor	0.5	0.6
RMSE	6.8	6.6
Bias	0.3	-0.5
MFB	0.1	-5.9

FGE	47.8	46.9
MeasExc40	17.0	18.0
HitRate40	4.2	0.0
FARate40	0.5	0.1
HSS40	0.0	0.0
CSI40	1.6	0.0
BiasRatio40	1.2	0.1
HitRateW40	11.4	0.0
FARateW40	1.4	0.2
HSSW40	0.0	0.0
CSIW40	1.9	0.0
BiasRatioW40	3.5	0.2
MeasExc100	0.0	0.0
HitRate100	0.0	0.0
FARate100	0.0	0.0
HSS100	0.0	0.0
CSI100	0.0	0.0
BiasRatio100	0.0	0.0
HitRateW100	0.0	0.0
FARateW100	0.0	0.0
HSSW100	0.0	0.0
CSIW100	0.0	0.0
BiasRatioW100	0.0	0.0

Tabelle 14: Metriken NO₂ Einstundenmittelwert, Verkehr, Gesamtjahr, Schwellenwert 40 µg/m³ und 100 µg/m³

	Metriken NO ₂ korrigiert, Bezug Gesamtjahr	Metriken NO ₂ unkorrigiert, Bezug Gesamtjahr
MinObs	1.5	1.5
MinMod	0.0	1.1
MeanObs	20.8	20.7
MeanMod	20.9	9.6
MaxObs	90.1	90.1
MaxMod	97.6	54.0
SDObs	11.5	11.5
SDMod	12.7	6.9
Cor	0.5	0.4
RMSE	12.0	15.8
Bias	0.2	-10.6
MFB	-2.7	-70.7
FGE	43.9	77.4
MeasExc40	483.0	493.0
HitRate40	34.7	1.5
FARate40	6.3	0.4
HSS40	0.2	0.0

CSI40	18.0	1.4
BiasRatio40	1.2	0.1
HitRateW40	56.3	3.0
FARateW40	16.5	0.7
HSSW40	0.2	0.0
CSIW40	16.2	2.5
BiasRatioW40	2.7	0.1
MeasExc100	0.0	0.0
HitRate100	0.0	0.0
FARate100	0.0	0.0
HSS100	0.0	0.0
CSI100	0.0	0.0
BiasRatio100	0.0	0.0
HitRateW100	0.0	0.0
FARateW100	0.0	0.0
HSSW100	0.0	0.0
CSIW100	0.0	0.0
BiasRatioW100	0.0	0.0

Tabelle 15: Metriken O₃ Einstundenmittelwert, Hintergrund, Gesamtjahr, Schwellenwert 120 µg/m³

	Metriken O ₃ korrigiert, Bezug Gesamtjahr	Metriken O ₃ unkorrigiert, Bezug Gesamtjahr
MinObs	0.5	0.5
MinMod	0.0	0.6
MeanObs	52.2	52.0
MeanMod	52.9	58.2
MaxObs	149.1	149.3
MaxMod	150.8	137.0
SDObs	26.8	26.8
SDMod	26.2	21.3
Cor	0.8	0.9
RMSE	16.6	15.0
Bias	0.6	4.8
MFB	3.3	16.0
FGE	33.7	29.9
MeasExc	77.5	78.0
HitRate	51.4	29.1
FARate	0.4	0.1
HSS	0.5	0.4
CSI	34.1	24.5
BiasRatio	1.0	0.5
HitRateW	68.5	43.4
FARateW	1.2	0.4
HSSW	0.4	0.4

CSIW	29.3	27.2
BiasRatioW	2.0	0.9

Tabelle 16: Metriken O₃ Einstundenmittelwert, Hintergrund, Episode, Schwellenwert 120 µg/m³

	Metriken O ₃ korrigiert, Bezug Episode	Metriken O ₃ unkorrigiert, Bezug Episode
MinObs	1.2	1.2
MinMod	0.3	21.3
MeanObs	64.8	64.3
MeanMod	65.2	69.7
MaxObs	149.3	149.7
MaxMod	150.8	137.3
SDObs	26.2	26.1
SDMod	25.9	18.8
Cor	0.8	0.8
RMSE	17.6	15.9
Bias	0.2	4.3
MFB	0.9	12.3
FGE	26.3	22.5
MeasExc	78.0	78.5
HitRate	51.5	29.2
FARate	0.9	0.2
HSS	0.5	0.4
CSI	34.2	24.8
BiasRatio	1.0	0.5
HitRateW	68.5	43.4
FARateW	2.5	0.8
HSSW	0.4	0.4
CSIW	29.3	27.2
BiasRatioW	2.0	0.9

Tabelle 17: Metriken O₃ Höchster Einstundenmittelwert des Tages, Hintergrund, Gesamtjahr, Schwellenwert 180 µg/m³ und 240 µg/m³

	Metriken O ₃ korrigiert, Bezug Gesamtjahr	Metriken O ₃ korrigiert Bezug, Gesamtjahr
MinObs	8.6	8.6
MinMod	17.7	19.1
MeanObs	76.0	76.0
MeanMod	78.7	76.1
MaxObs	149.1	149.3
MaxMod	150.7	136.7
SDObs	25.6	25.6
SDMod	24.4	20.8
Cor	0.9	0.9

RMSE	12.5	11.3
Bias	2.6	-0.3
MFB	4.7	1.6
FGE	13.9	13.3
MeasExc180	0.0	0.0
HitRate180	0.0	0.0
FARate180	0.0	0.0
HSS180	0.0	0.0
CSI180	0.0	0.0
BiasRatio180	0.0	0.0
MeasExc240	0.0	0.0
HitRate240	0.0	0.0
FARate240	0.0	0.0
HSS240	0.0	0.0
CSI240	0.0	0.0
BiasRatio240	0.0	0.0

Tabelle 18: Metriken O₃ Höchster Einstundenmittelwert des Tages, Hintergrund, Episode, Schwellenwert 180 µg/m³ und 240 µg/m³

	Metriken O ₃ korrigiert, Bezug Episode	Metriken O ₃ unkorrigiert, Bezug Episode
MinObs	55.4	55.4
MinMod	55.7	57.0
MeanObs	94.7	94.7
MeanMod	96.3	91.2
MaxObs	149.3	149.7
MaxMod	150.8	137.0
SDObs	18.3	18.3
SDMod	17.4	14.8
Cor	0.8	0.9
RMSE	11.9	10.7
Bias	1.7	-3.0
MFB	2.0	-2.8
FGE	9.7	8.8
MeasExc180	0.0	0.0
HitRate180	0.0	0.0
FARate180	0.0	0.0
HSS180	0.0	0.0
CSI180	0.0	0.0
BiasRatio180	0.0	0.0
MeasExc240	0.0	0.0
HitRate240	0.0	0.0
FARate240	0.0	0.0
HSS240	0.0	0.0
CSI240	0.0	0.0

BiasRatio240	0.0	0.0
--------------	-----	-----

Tabelle 19: Metriken O₃ Höchster Achtstundenmittelwert des Tages, Hintergrund, Gesamtjahr, Schwellenwert 120 µg/m³

	Metriken O ₃ korrigiert, Bezug Gesamtjahr	Metriken O ₃ unkorrigiert, Bezug Gesamtjahr
MinObs	6.6	6.6
MinMod	13.8	15.3
MeanObs	70.0	69.9
MeanMod	71.0	72.2
MaxObs	136.6	136.7
MaxMod	137.6	127.7
SDObs	24.8	24.8
SDMod	23.9	20.3
Cor	0.9	0.9
RMSE	10.7	10.7
Bias	1.0	1.4
MFB	2.6	4.3
FGE	13.5	13.9
MeasExc	8.0	8.0
HitRate	53.1	27.0
FARate	0.9	0.3
HSS	0.5	0.4
CSI	37.2	23.1
BiasRatio	1.0	0.3

Tabelle 20: Metriken O₃ Höchster Achtstundenmittelwert des Tages, Hintergrund, Episode, Schwellenwert 120 µg/m³

	Metriken O ₃ korrigiert, Bezug Episode	Metriken O ₃ unkorrigiert, Bezug Episode
MinObs	51.4	50.4
MinMod	50.3	54.6
MeanObs	88.3	88.2
MeanMod	88.3	87.1
MaxObs	136.7	136.9
MaxMod	137.8	127.8
SDObs	16.9	17.0
SDMod	16.4	13.6
Cor	0.8	0.8
RMSE	10.4	9.8
BIAS	0.2	-0.6
MFB	0.4	-0.2
FGE	9.1	8.6

MeasExc	8.0	8.0
HitRate	53.6	27.3
FARate	1.8	0.6
HSS	0.5	0.4
CSI	37.5	23.3
BiasRatio	1.0	0.3

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt

Fachgebiet II4.2

06844 Dessau-Roßlau

immission@uba.de

Internet: www.umweltbundesamt.de

 [umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Stand: April/2026