

Luftqualität und Verkehr am Mehringdamm

Zwischenbericht im Rahmen des eUVM-Projekts

Autorenteam

Seán Schmitz
Beyza Kesen
Lorena Vega García
Erika von Schneidemesser

Unterstützt von:

Die hier dargestellte Forschung ist Bestandteil des Rahmenvertrags "Evaluation der durchgeführten Maßnahmen im Rahmen des eUVM-Projektes sowie Vorschläge zur zeitnahen Nachsteuerung der verkehrlichen Maßnahmen", beauftragt und finanziert von der Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt in Berlin (Sen-MVKU). Dieser ist wiederum Teil der Forschungsinitiative "eUVM: Aufbau und Betrieb eines erweiterten umweltsensitiven Verkehrsmanagementsystems in Berlin" (Laufzeit: 01.01.2020 bis 31.09.2025), gefördert durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV).

Zusammenfassung (DE)

In diesem Zwischenbericht wird über die Vermessung der Luftqualität und des Verkehrs an der Kreuzung Mehringdamm / Gneisenaustraße / Yorckstraße in Berlin im Zeitraum März bis Oktober 2024 berichtet. Die Kreuzung weist eine schlechte Luftqualität mit hohen NO_2 -Konzentrationen und einen ineffizienten Verkehrsfluss auf. Dies soll sich mit Hilfe einer neuen Kreuzungstopologie verbessern, indem ein optimierter Verkehrsfluss geschaffen wird sowie lokale Staus und Luftverschmutzung verringert werden. Ziel des Projekts ist die Durchführung und anschließende Bewertung einer geplanten Neu-Organisation des Verkehrs im Knotenpunkt einschließlich einer entsprechenden Anpassung der Knotenpunktgeometrie (Lageplan) und der Lichtsignalanlage (LSA), um nachzuweisen, ob Verkehrsfluss und -effizienz sowie Luftqualität verbessert werden konnten. **In diesem Zwischenbericht wird die Situation vor Einführung einer neuen Kreuzungstopologie betrachtet und beschrieben.**

Für die Erfassung von Luftschadstoff- und Verkehrsdaten wurden EarthSense-Zephyr-Sensoren und OpenTrafficCam-Kameras verwendet. An fünf strategisch ausgewählten Punkten an der Kreuzung wurden Stickoxide (NO_x), Ozon (O_3) und Feinstaubpartikel mit einem Durchmesser von maximal 2,5 Mikrometern ($\text{PM}_{2,5}$) gemessen und an drei von den fünf Punkten Verkehrszählungen durchgeführt. Während der Messphase wurden die EarthSense-Zephyr-Sensoren an Messcontainern des BLUME-Netzwerks mehrfach kalibriert, um Konzentrationen genauer messen zu können.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Luftqualität am Mehringdamm etwas schlechter ist als an Gneisenaustraße und Yorckstraße, obwohl die Stickstoffdioxid-Konzentrationen unter dem aktuellen EU-Grenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen. Sie könnten allerdings den kommenden Grenzwert von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschreiten. Jedoch aufgrund der Ungenauigkeit der Messgeräte können keine verlässlichen Schlussfolgerungen zu Grenzwertüberschreitungen getroffen werden.

Nach der Normalisierung der mit EarthSense-Zephyr-Sensoren gemessenen Konzentrationen zu Durchschnittswerten des städtischen Hintergrunds konnte festgestellt werden, dass es für NO und NO_2 an allen Standorten einen signifikanten Beitrag von lokalen Emissionen aus dem Verkehr gibt. Eine starke Titration¹ der O_3 -Konzentrationen ist ein weiterer Hinweis auf erhöhte lokale NO_x -Emissionen. Für beide Schadstoffe entsprechen die lokalen Beiträge den an den einzelnen Standorten gemessenen tageszeitlichen Verkehrsmustern, wobei die lokalen Konzentrationen bei anhaltendem Verkehrsaufkommen den ganzen Tag über kontinuierlich ansteigen. $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentrationen sind an allen Standorten gleichbleibend und werden eher von städtischen Abgasen und regionalen Ereignissen beeinflusst. Darüber hinaus wirkt sich die Windrichtung erheblich auf die Verteilung von NO_x und O_3 in der Straßenschlucht des Mehringdamms aus.

Die Verkehrsdaten zeigen ein höheres Verkehrsaufkommen am Mehringdamm im Vergleich zur Gneisenaustraße, mit stabileren Wochentagstrends und ähnlichen Werten am Wochenende. Der Lkw-Verkehr nimmt an Wochenenden und abends deutlich ab. Vergleiche zwischen manuellen Zählungen und Kamerazählungen zeigen, dass das Verkehrsaufkommen bei Kamerazählungen unterschätzt wird, was besonders bei schattigen und regnerischen Bedingungen aufgrund schlechter Sichtverhältnisse deutlich wird. Nichtsdestotrotz sind die Zahlen des Pkw- und Lkw-Verkehrs in einem erwarteten Bereich (z. B., 12.000-15.000 Pkw/Tag/Richtung). Das Autorenteam empfiehlt, die Kreuzungstopologie inkl. des LSA-Systems an die spezifischen Verkehrs- und Emissionsmuster anzupassen und weitere Untersuchungen durchzuführen, um die Wirksamkeit des Systems abschließend bewerten zu können.

¹ In der Atmosphärenchemie spricht man von „Titration“, wenn Ozon (O_3) durch Reaktion mit Stickoxiden – insbesondere mit Stickstoffmonoxid (NO) – abgebaut wird. Wenn in der Luft hohe NO_x -Emissionen (Stickoxide) vorliegen, reagieren diese mit dem vorhandenen Ozon. Das Ergebnis ist eine merkliche Absenkung („Titration“) der Ozonkonzentration.

Inhaltsverzeichnis

1 EINFÜHRUNG	7
2 METHODEN	8
2.1 Messstandorte	8
2.2 Geräte	9
2.2.1 EarthSense-Zephyr-Sensoren	9
2.2.2 Passam-NO ₂ -Passivsammler	9
2.2.3 OpenTrafficCam	10
2.2.4 Datenverfügbarkeit und Leistung	10
2.3 Analytische Herangehensweise	11
2.3.1 Analyse der Luftqualität, Meteorologie und Verkehrsdaten	11
2.3.2 Vergleich von manuellen und OTAnalytics-Zählungen	12
3 ERGEBNISSE	14
3.1 Meteorologische Bedingungen	14
3.2 Luftqualitätsmessungen	15
3.3 Verkehrszählungen	21
4 FAZIT	23
5 LITERATURVERZEICHNIS	24

Abbildungen

Abb. 1. Karte des Messstandorts Mehringdamm. Zephyrs sind durch blaue Quadrate, OTC-Kameras durch grüne Quadrate und Passivsammler durch einen roten Kreis gekennzeichnet.	8
Abb. 2. Vorherrschende stündliche Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der DWD-Wetterstation Tempelhof nach Monaten geordnet	14
Abb. 3. Tägliche Durchschnittskonzentrationen für NO, NO ₂ , O ₃ und PM _{2,5} an jedem Standort. Eine geglättete Linie der besten Anpassung wurde hinzugefügt, um allgemeine Trends im Laufe der Zeit aufzuzeigen. Die Schattierung um die geglättete Linie zeigt das 95-Prozent-Konfidenzintervall der geglätteten Anpassung an. Die Datenlücke von Mitte Juni bis Anfang Juli ist auf einen Standortwechsel zurückzuführen.	17
Abb. 4. Stündliche Durchschnittswerte für NO, NO ₂ , O ₃ und PM _{2,5} für die gesamte Kampagne (März-Oktober) nach Wochentagen und Wochenenden. Diese diurnalen Diagramme zeigen tägliche Trends der Luftverschmutzung an jedem Standort.	18
Abb. 5. Durchschnittliche stündliche NO-, NO ₂ -, O ₃ - und PM _{2,5} -Konzentrationen an Wochentagen und Wochenenden, normiert auf die durchschnittlichen städtischen Hintergrundkonzentrationen, geordnet nach Messstellen.	18
Abb. 6. Boxplots der durchschnittlichen stündlichen NO-, NO ₂ -, O ₃ - und PM _{2,5} -Konzentrationen, normiert auf die durchschnittlichen städtischen Hintergrundkonzentrationen und geordnet nach Messstandort	19
Abb. 7. Stündliche Durchschnittswerte der Konzentrationen von NO, NO ₂ , O ₃ und PM _{2,5} in Form von Windrosen, basierend auf den Windrichtungsdaten der DWD-Wetterstation Tempelhof. Die Windrosen zeigen die Verteilung der Schadstoffkonzentrationen in Abhängigkeit von der vorherrschenden Windrichtung, die in Konzentrationsbereiche unterteilt ist.	20
Abb. 8. Vergleich der NO ₂ -Konzentrationen, die mit Passivsammlern gemessen wurden, mit den Zephyr-Daten am MSW-Standort bei einer zweiwöchigen Auflösung. Unsicherheitsbereiche für die Passivsammler sind enthalten und repräsentieren eine Unsicherheit von 20 Prozent der Messung. Der Zeitraum von zwei Wochen beginnt am angegebenen Datum.	20
Abb. 9. Durchschnittliche stündliche Zählungen von Pkw, Lkw, Bussen und Motorrädern an Wochentagen und Wochenenden während der gesamten Kampagne (März-Juni, soweit Daten verfügbar waren). zu Beachten ist, dass die y-Achse auf einer logarithmischen Skala abgebildet ist.	21
Abb. 10. Durchschnittliche tägliche Gesamtzahlen von Pkw, Lkw, Bussen und Motorrädern während der gesamten Kampagne (März-Juni) für Montag-Donnerstag, Freitag, Samstag und Sonntag. zu Beachten ist, dass die y-Achse auf einer logarithmischen Skala dargestellt ist. Die Balken stellen eine Standardabweichung über und unter dem durchschnittlichen Tageswert dar.	22

Tabellen

Tabelle 1. Die fünf Messstandorte an der Mehringdamm-Messstelle mit Adressen, Kürzeln und den dort installierten Geräten	8
Tabelle 2. Standorte und Zeiträume der Co-Locations zur Kalibrierung der Zephyrs	9
Tabelle 3. Verfügbarkeitszeiträume für Videodaten jeder Kamera. Langfristige Datenverluste sind auf Kameradefekte und anschließende Reparaturen zurückzuführen.	11
Tabelle 4. tage, an denen Verkehrsdaten aufgrund von ausfällen, Blockaden oder downloads nicht erfasst wurden	12
Tabelle 5. Ergebnisse der Vergleiche zwischen den automatischen OTAnalytics-Zählungen und manuellen Handzählungen. *Diese berechnungen widerspiegeln die ungenauigkeit nach start der Verkehrszähler und sind nicht in den durchschnittsberechnungen berücksichtigt.	13
Tabelle 6. Monatliche Durchschnittswerte der meteorologischen Bedingungen während der Kampagne. Die Daten stammen von der DWD-Wetterstation am Tempelhofer Feld.	14
Tabelle 7. Monatliche Durchschnittswerte der Luftschadstoffkonzentrationen für jeden Standort an der Mehringdamm-Messstelle. Unsicherheitsbereiche sind für alle Messungen angegeben, mit Ausnahme von O ₃ , da Kalibrierungsdaten von EarthSense verwendet wurden und keine Unsicherheitsbereiche verfügbar sind. Alle Konzentrationen sind in µg/m ³ angegeben.	16
Tabelle 8. Durchschnittliche tägliche Gesamtzahlen von Pkw, Lkw, Bussen und Motorrädern während der gesamten Kampagne (März-Juni) für verschiedene Wochentage. Diese beziehen sich auf nur eine Fahrtrichtung. Diese Werte entsprechen den in Abbildung 10 dargestellten Werten.	22

1 Einführung

Die Stadt Berlin arbeitet aktiv an einer Optimierung des städtischen Verkehrsmanagements, um die Luftqualität zu verbessern und die Effizienz des Verkehrs zu steigern. Die Kreuzung von Mehringdamm / Gneisenaustraße / Yorckstraße ist ein Bereich, der durch schlechte Luftqualität gekennzeichnet ist, einschließlich hoher Stickstoffdioxid-Konzentrationen (NO₂). Um dieses Problem anzugehen, plant das Land Berlin, den Verkehr im Knotenpunkt neu zu organisieren und die erforderlichen Anpassungen der Knotenpunktgeometrie (insbesondere Führung der Linksabbieger unter Abschaffung einer Verkehrsinsel in Mittellage) und der Lichtsignalanlage (LSA) durchzuführen. Die Maßnahmen zielen darauf ab, den motorisierten Verkehrsfluss zu optimieren, Staus zu reduzieren und die Luftqualität zu verbessern.

Das Konzept der LSA ist von zentraler Bedeutung für ein modernes Verkehrsmanagement, bei dem die Ampelschaltungen so koordiniert werden, dass die Zahl der Stopps und der Leerlaufzeiten auf ein Minimum reduziert wird, wodurch Emissionen und Kraftstoffverbrauch gesenkt werden. Ein schlechter Verkehrsfluss, der durch häufige Stopps und Leerlauf gekennzeichnet ist, führt zu höheren Emissionen von verkehrsbedingten Schadstoffen wie Stickoxiden (NO_x) und Feinstaub (PM) aufgrund des erhöhten Kraftstoffverbrauchs beim Beschleunigen (Kim et al., 2014). In einer Studie, die diese Problematik unterstreicht, waren die gemessenen NO_x-Konzentrationen an Kreuzungen 24 Prozent höher als auf der Straße zwischen zwei Kreuzungen (Kwak et al., 2018). Durch die Optimierung von Ampelanlagen auf die bestehenden Verkehrsströme können erhebliche Verbesserungen der Verkehrsüberlastung und der lokalen Luftqualität erzielt werden.

Mehrere Studien haben gezeigt, dass eine Verringerung des Verkehrsaufkommens an Kreuzungen durch eine optimierte Ampelschaltung die lokale Luftqualität verbessern kann. Madireddy et al. (2011) and De Coensel et al. (2012) fanden heraus, dass ein Verkehrssignalsystem mit grüner Welle die NO_x-Emissionen um zehn Prozent reduzieren kann. Schroeder et al. (2024) fanden ein ähnliches Ergebnis, wobei die NO_x-Emissionen in einem Radius von 15 Metern um die Kreuzung um 23 Prozent zurückgingen, wenn die Umlaufzeit der Ampel verlängert wurde. Dies führte jedoch zu einem Anstieg der NO_x-Belastung von Fußgängern um 46 Prozent aufgrund der längeren Wartezeiten. Kim et al. (2014) klassifizierten die Muster der NO_x-Belastung an Kreuzungen mit Ampelsystemen und stellten fest, dass die höchsten Emissionen in Situationen der Verlangsamung, des Leerlaufs und der Beschleunigung auftraten, wobei die Emissionen bei der Verlangsamung und im Leerlauf geringfügig ab- oder zunahm und bei der anschließenden Beschleunigung stark anstiegen; ein Ergebnis, das durch andere Studien (Kwak et al., 2018; Liora et al., 2021) bestätigt wird. Zusammengefasst deuten die Ergebnisse der Studien darauf hin, dass die Optimierung der Ampelschaltung den Verkehrsfluss verbessern und die NO_x-Emissionen verringern kann. Wie in einer der Studien hervorgehoben wurde, gibt es jedoch mögliche Kompromisse, bei denen beispielsweise die Wartezeit für Fußgänger:innen (einschließlich einer möglichen erhöhten Luftschadstoffbelastung), die Auswirkungen auf andere Mobilitätsarten sowie Faktoren wie etwa Lärm und Sicherheit ebenfalls berücksichtigt werden sollten.

Um den Zustand am Knotenpunkt bis dato zu dokumentieren, wurden an der Kreuzung Mehringdamm / Gneisenaustraße / Yorckstraße Verkehrs- und Luftqualitätsmessungen mit OpenTrafficCam-Kameras und EarthSense-Zephyr-Luftqualitätssensoren durchgeführt (NO₂, NO, O₃ und PM_{2,5}). Es ist geplant mit diesen Werkzeugen auch nach Einführung der neuen Verkehrsorganisation am Knotenpunkt die gleichen Daten zu erheben und diese mit dem Zustand von davor zu vergleichen. Dieses Projekt will den potenziellen positiven Beitrag einer optimierten Kreuzungstopologie zur Verbesserung der Luftqualität und der Verkehrseffizienz aufzeigen. So kann es als Modell für ähnliche Anwendungen in der gesamten Stadt dienen. Im vorliegenden ersten Zwischenbericht präsentiert das Autorenteam die Untersuchungsergebnisse zur lokalen Luftqualität und zum Verkehrsaufkommen des Status quo.

2 Methoden

Um die aktuelle Luftqualität und den Verkehr an der Kreuzung Mehringdamm / Gneisenaustraße / Yorckstraße zu bewerten, wurden mehrere Luftqualitätssensoren und Verkehrskameras installiert. An fünf Standorten an der Kreuzung wurden EarthSense-Zephyr-Sensoren installiert. Daneben sind zusätzlich drei OTC-Kameras von OpenTrafficCam angebracht worden, wobei zwei Standorte seit dem 1. März 2024 und ein dritter Standort seit dem 23. April 2024 Daten liefern. Das Ende der Messkampagne im Status quo war am 18.12.2024.

2.1 Messstandorte

Tabelle 1 bietet eine Übersicht der fünf ausgewählten Standorte, einschließlich der Straßenadressen, der installierten Geräte und der im Bericht verwendeten Kurzbezeichnungen (Kürzel). An jedem Standort wurden mobile Masten in der Nähe von Laternenmasten aufgebaut, von denen der Strom für die Geräte bezogen wurde.

TABELLE 1. DIE FÜNF MESSSTANDORTE AN DER MEHRINGDAMM-MESSSTELLE MIT ADRESSEN, KÜRZELN UND DEN DORT INSTALLIERTEN GERÄTEN

Adresse	Kürzel	Zephyr	OTC-Kamera
Mehringdamm 32	MNW	z867	OTC 03
Mehringdamm 45	MSO	z863	OTC 01
Mehringdamm 48**	MSW	z543 / z872 *	NA
Yorckstraße 86	YW	z860	NA
Gneisenaustraße 111	GO	z923	OTC 02

* Am Standort MSW trat ein technischer Defekt bei z543 auf, der im Sommer durch z872 ersetzt wurde. **Der Passivsammler am Mehringdamm befindet sich an diesem Standort.

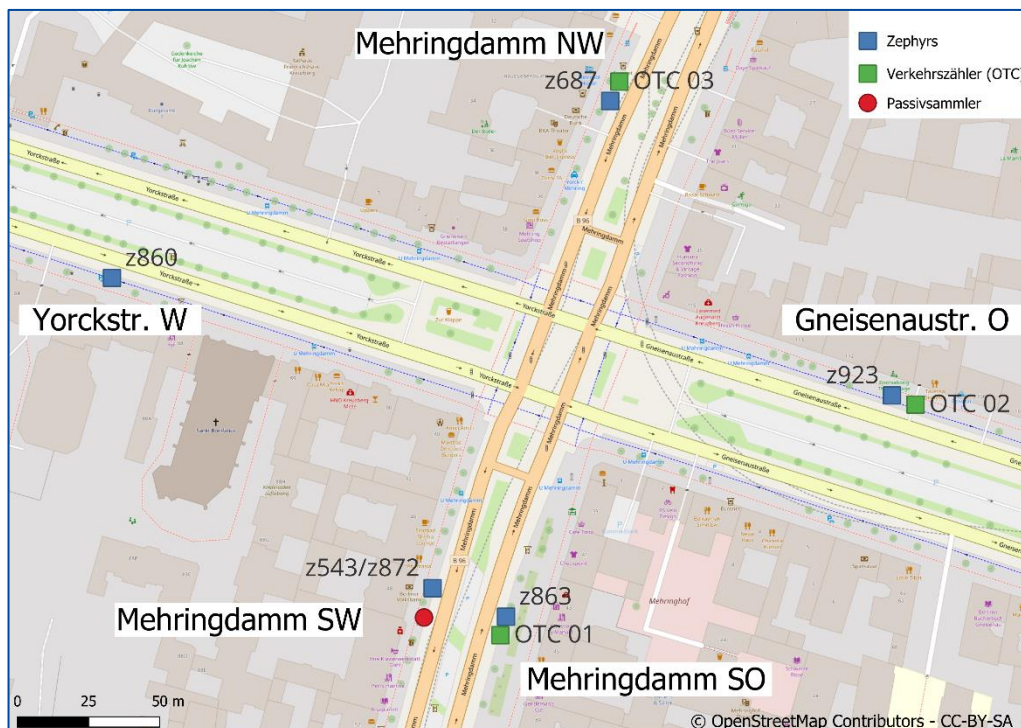


ABB. 1. KARTE DES MESSSTANDORTS MEHRINGDAMM. ZEPHYRS SIND DURCH BLAUE QUADRATE, OTC-KAMERAS DURCH GRÜNE QUADRATE UND PASSIVSAMMLER DURCH EINEN ROTEN KREIS GEKENNZEICHNET.

Abbildung 1 zeigt eine Karte der Mehringdamm-Messstelle mit Symbolen für die Zephyr- und OTC-Kamera-Standorte. Ebenfalls dargestellt sind die an der MSW-Position installierten Passivsammler des SenMVKU. Die fünf Standorte wurden strategisch ausgewählt, um die Luftqualität und den Verkehr von Fahrzeugen zu messen, die sich der Kreuzung nähern, anstatt stationären Verkehr (z. B. bei Rotlicht) zu erfassen. Die Entfernung zur Kreuzung wurde so gewählt, dass die Dynamiken der Kreuzung selbst für die Verkehrszählung und Luftverschmutzung nicht erfasst werden oder vernachlässigbar sind. Daher liegen die Messpunkte weiter von der Kreuzung entfernt und vermeiden größtenteils Bereiche mit Bus- und Lkw-Parkplätzen.

2.2 Geräte

2.2.1 EarthSense-Zephyr-Sensoren

In dieser Studie wurden EarthSense-Zephyr-Sensoren verwendet, um verschiedene Luftschadstoffe zu messen, darunter Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂), Ozon (O₃) und Feinstaub (PM_{2,5}). Diese Geräte verwenden elektrochemische Sensoren von AlphaSense zur Messung gasförmiger Schadstoffe sowie optische Partikelzähler (OPCs) von Plantower zur Messung von Feinstaub. Um kompaktere Bauweisen und geringere Kosten zu ermöglichen, nutzen diese Sensoren ein Messprinzip, das eine höhere Unsicherheit aufweist als standardisierte Referenzinstrumente. Dennoch ist ihre Genauigkeit, insbesondere bei stündlicher Auflösung, ausreichend, um die indikativen Luftverschmutzungswerte an einem Standort zu erfassen. Trotz der höheren Unsicherheit ermöglicht die kompakte Bauweise der Sensoren Messungen an solchen Orten, die mit Referenzgeräten nicht durchführbar wären.

Um die Genauigkeit zu verbessern und die Sensoren an lokale Umweltbedingungen anzupassen, wurden die Zephyrs an mehreren Straßenmessstationen des Berliner Luftgütemessnetzes (BLUME) kalibriert (Tabelle 2). Diese Messstationen wurden aufgrund ähnlicher Verkehrsaufkommen und urbaner Topografie wie am Mehringdamm ausgewählt. Da das Verkehrsaufkommen an der Station MC117 nach der ersten Co-Location aufgrund eines großen Bauprojekts stark zurückging, was zu niedrigeren lokalen Schadstoffkonzentrationen führte, mussten zwei Stationen für die Kalibrierung verwendet werden (MC117, MC174). Mithilfe dieser Co-Locations wurden die Einheiten für jeden Schadstoff gemäß der 7-Schritte-Methode (Schmitz et al., 2021) kalibriert. Dabei werden Ausreißer entfernt, ein Mehrfachregressionsmodell (MLR) erstellt und validiert sowie die vorhergesagten Konzentrationen experimenteller Daten mit einer entsprechenden Unsicherheitsbewertung exportiert. Diese Kalibrierung wurde für NO, NO₂, O₃ und PM_{2,5} durchgeführt.

TABELLE 2. STANDORTE UND ZEITRÄUME DER CO-LOCATIONS ZUR KALIBRIERUNG DER ZEPHYRS

Station	Adresse	Daten	Kalibrierten Zephyrs
MC117	Schildhornstr. 76	22.01.2024 - 08.02.2024	860, 923, 687, 543, 863, 872
MC174	Frankfurter Allee 86b	17.06.2024 - 02.07.2024	860, 923, 687, 543, 863
MC174	Frankfurter Allee 86b	21.10.2024 - 04.11.2024	860, 923, 687, 863, 872

2.2.2 Passam-NO₂-Passivsammler

Am Standort MSW sind seit vielen Jahren Passam-NO₂-Passivsammler installiert, die Daten für den SenMVKU erfassen. Diese Geräte sind Röhrchentyp-Sammler, die durch Adsorption von NO₂ auf einem Sorptionsfilm im Inneren der Röhrchen (in der Regel Triethanolamin) arbeiten. Die Sammler werden alle zwei Wochen ausgetauscht und zur Analyse an ein Labor geschickt, wodurch eine Zeitauflösung von zwei Wochen erreicht wird. Laut einer Bewertung des Joint Research Council (JRC) der Europäischen Union neigen Passam-Passivsammler dazu, die Werte leicht zu überschätzen, und weisen eine relative erweiterte Unsicherheit zwischen 20 und 25 Prozent auf (Hafkenscheid et al., 2009). Dennoch gelten sie allgemein als geeignet für indikative Messungen von NO₂ und werden häufig verwendet, um Daten von Messstationen zu ergänzen und zusätzliche Informationen über mögliche Hotspots zu liefern.

2.2.3 OpenTrafficCam

OpenTrafficCam (OTC) ist ein quelloffenes, automatisiertes System zur Erfassung und Analyse von Verkehrsdaten. Es wurde für Forschungs- und Verkehrsmanagementanwendungen entwickelt und wird hauptsächlich in kurzfristigen Setups genutzt, wobei es an bestehender Infrastruktur montiert wird, um Videodaten autonom zu erfassen. Um den Datenschutz zu gewährleisten, nutzt das System Bilder mit niedriger Auflösung und Positionierungsmethoden, die persönliche Details von Personen im Verkehrsraum minimieren und den Anforderungen der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) entsprechen.

Das OTC-System besteht aus drei Hauptkomponenten:

- **OTC-Kamera:** Die Hardware-Kameraeinheit, die für (kurzzeitige) Verkehrszählungen und autonome Videoaufzeichnungen eingesetzt wird.
- **OTVision:** Dieses Modul erkennt und klassifiziert verschiedene Arten von Verkehrsteilnehmenden (bis zu 18 Klassen, darunter Fahrzeuge, Radfahrende und Fußgänger:innen) in den aufgezeichneten Videos. Die quelloffene Version erkennt sieben verschiedene Verkehrsklassen. Mit einer Sammlung von Algorithmen führt sie Objekterkennung und -verfolgung durch, um Bewegungsverläufe für jeden Verkehrsteilnehmenden zu erstellen.
- **OTAnalytics:** Dieses Modul verarbeitet die von OTVision erfassten Bewegungsverläufe, um aggregierte Verkehrsdaten wie Fahrzeugzahlen und Geschwindigkeiten zu generieren. Es bereitet die Daten für Planungszwecke auf und ermöglicht den Export der Datensätze als CSV-Dateien.

Weitere Dokumentationen zu diesen Modulen sind auf der OTC-Webseite verfügbar¹. In der quelloffenen Version unterstützt das OTC-System vor allem die Verkehrszählungsanalyse.

2.2.4 Datenverfügbarkeit und Leistung

Die Kameras zeichnen grundsätzlich täglich in 15-minütigen Videoabschnitten zwischen 06:00 und 22:00 Uhr auf, sofern genügend Tageslicht vorhanden ist. Ausnahmen bilden Zeiträume für Datenübertragungen, Hardwareausfälle oder Stromunterbrechungen. Tabelle 3 zeigt die Zeiträume, in denen kontinuierliche Videoaufzeichnungen für jede Kameraposition verfügbar waren, einschließlich Lücken von mehr als einem Tag. Downloadzeiten werden in die Aufzeichnungszeiträume einbezogen, da die Datenübertragung in der Regel nur einige Stunden dauert.

Die Kameras sind etwa 3,5 Meter über dem Boden am Straßenrand montiert und so ausgerichtet, dass sie den Verkehr in eine Richtung optimal erfassen. Geparkte größere Fahrzeuge können jedoch gelegentlich die Sicht auf die Straße teilweise oder vollständig blockieren. Alle überwachten Straßen in der Studienregion verfügen über Parkplätze vor den Kameras, was gelegentlich zu einer Unterschätzung der Verkehrszählungen führen kann wie beispielsweise durch Lieferfahrzeuge, die den Kamerablick auf die Straße beeinträchtigen. Tage, an denen Straßensperrungen oder Baustellen Teile der Straße oder die gesamte Straße blockieren, wurden dokumentiert und aus der Analyse ausgeschlossen.

Nach der erneuten Installation der Kameras nach einem Datendownload können die Verkehrszählungen in den ersten 15 Minuten einer Aufnahmeperiode unterschätzt und in den darauffolgenden 15 Minuten leicht überschätzt werden. Nach 30-minütigen Videoaufzeichnungen kehren die Verkehrszählungen in den normalen Fehlermargenbereich zurück.

¹ <https://opentrafficcam.org/>

TABELLE 3. VERFÜGBARKEITZEITRÄUME FÜR VIDEODATEN JEDER KAMERA. LANGFRISTIGE DATENVERLUSTE SIND AUF KAMERADEFEKTE UND ANSCHLIEßENDE REPARATUREN ZURÜCKZUFÜHREN.

Ort	Anfangsdatum	Enddatum
MSO	01.03.2024	20.09.2024
	24.09.2024	18.12.2024
GO	01.03.2024	08.04.2024
	23.05.2024	29.05.2024
	25.06.2024	24.07.2024
	22.10.2024	18.12.2024
MNW	23.04.2024	26.04.2024
	23.05.2024	25.05.2024
	24.06.2024	10.07.2024
	18.07.2024	21.07.2024
	24.07.2024	25.07.2024
	29.08.2024	20.09.2024
	27.09.2024	18.12.2024

Sonnenlicht oder Reflexionen, die die Kameralinsen beeinträchtigen, können die Aufnahmegenauigkeit beeinflussen. Die Kameraperspektive ist so ausgerichtet, dass der Himmel nicht im Sichtfeld liegt, jedoch ist die vollständige Vermeidung des Problems nicht möglich. Dies kann zu einer Unterschätzung der Verkehrszählungen führen (siehe Tabelle 5). Obwohl die Kameras ihren Kontrast automatisch anpassen, kann dies eine schlechte Sicht auf die Straße zur Folge haben. Dieser Effekt tritt insbesondere bei sehr hellen oder dunklen geparkten Fahrzeugen in der Nähe der Kamera auf. An regnerischen Tagen können Reflexionen, an besonders sonnigen Tagen starke Kontraste (z. B. Schatten von Bäumen) ebenfalls die Erfassung beeinflussen.

Die Kameras neigen auch dazu, Fahrzeuge, die am weitesten von der Kamera entfernt sind, aufgrund der geringeren Auflösung zu unterschätzen. Dies führt zu Unterschieden zwischen den automatischen Zählungen der Kameras und manuellen Zählungen (siehe Tabelle 4). Diese Effekte sind insbesondere bei Regen und bei sehr sonnigen Tagen stärker ausgeprägt, weshalb die Kamera an solchen Tagen ungenauere Verkehrszählungen liefert.

2.3 Analytische Herangehensweise

2.3.1 Analyse der Luftqualität, Meteorologie und Verkehrsdaten

Für die in diesem Bericht präsentierte Analyse wurden Luftqualitätsdaten aus dem Zeitraum März bis Oktober 2024 verwendet. Daten aus den Monaten November und Dezember werden in einem Abschlussbericht berücksichtigt. Langfristige Trends für jeden Schadstoff wurden sowohl als tägliche Mittelwerte als auch als durchschnittliche Tagesmuster dargestellt. Allgemeine Vergleiche zwischen den Messorten werden präsentiert. Ein Vergleich der Stickstoffdioxidkonzentrationen (NO₂) von Passivsammlern und Zephyr-Sensoren mit einer zweiwöchigen Auflösung wurde für den Standort MSW durchgeführt. Die Zephyr-Daten wurden auch mit verfügbaren meteorologischen Daten der DWD-Wetterstation am Flughafen Tempelhof verglichen.

Um den Gesamtbeitrag der lokalen Emissionen zu den gemessenen Werten der einzelnen Luftschadstoffe zu verstehen, wurde ein Abgleich mit dem städtischen Hintergrundbelastungen vorgenommen (Normalisierung). Dazu wurden für jeden Schadstoff die Durchschnittswerte aller verfügbaren städtischen Hintergrundmessstellen des BLUME-Messnetzes verwendet. Diese Werte wurden dann von den am Mehringdamm in stündlicher Auflösung gemessenen Konzentrationen subtrahiert. Diese "normalisierten" Konzentrationen

werden anschließend in Abbildungen und Tabellen dargestellt und geben den Beitrag der lokalen Emissionen zu jedem Luftschadstoff wieder.

Da die Analyse von Verkehrsdaten mit OTAnalytics erhebliche Rechenzeit erfordert, waren Verkehrszählungen nur für den Zeitraum vom Anfang März bis Ende Juni 2024 für diesen Bericht verfügbar. Diese Werte sind als vorläufig zu betrachten, bis alle Daten in einem Endbericht evaluiert werden können. Durchschnittliche Tages- und Stundenwerte der Verkehrszählungen für Autos, Lastwagen, Busse und Motorräder wurden für jeden Standort ermittelt. Fußgänger- und Fahrradzahlungen wurden nicht einbezogen, da die Kamerawinkel Gehwege oder Radwege in den meisten Fällen nicht erfassten. Für die Analyse wurden Tage mit erheblichen Datenlücken aufgrund von Downloads oder Ausfällen, die mindestens eine Stunde lang waren, aus dem Datensatz ausgeschlossen, um Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Die Tage, die aufgrund dieser Lücken entfernt wurden, sind in Tabelle 4 aufgeführt.

TABELLE 4. TAGE, AN DENEN VERKEHRSDATEN AUFGRUND VON AUSFÄLLEN, BLOCKADEN ODER DOWNLOADS NICHT ERFASST WURDEN

Ort	Daten
MSO	2024-03-01, 2024-03-26, 2024-04-08, 2024-05-02, 2024-05-29, 2024-06-24, 2024-07-03, 2024-07-24, 2024-08-07, 2024-08-29
GO	2024-03-01, 2024-03-25, 2024-03-26, 2024-04-08, 2024-05-23, 2024-05-29, 2024-06-24, 2024-07-24
MNW	2024-04-23, 2024-05-23, 2024-05-25, 2024-06-24, 2024-07-21, 2024-08-29

2.3.2 Vergleich von manuellen und OTAnalytics-Zählungen

Die Ergebnisse der automatischen Zählungen von OTAnalytics wurden mit manuellen Zählungen für zufällige Zeiträume und Tage zwischen März und Juni verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kamerazählungen den manuellen Zählungen nahekommen, sofern keine externen Faktoren wie Kontrastprobleme oder blockierte Sicht die Aufnahmen beeinträchtigen. Tabelle 4 zeigt eine Auswahl der Vergleichsergebnisse. Für alle untersuchten Fahrzeugtypen (Autos, Busse, Lastwagen und Motorräder) betragen die berechneten mittleren prozentualen Fehler (MPE) minus zwölf Prozent. Der hier angegebene Fehlerprozentsatz ist wahrscheinlich höher als der tatsächliche Wert, da extreme Fälle von Zählproblemen, die nicht häufig auftreten, in die zufällige Auswahl der Videos einbezogen wurden.

Die Berechnungen für MPE basieren auf der folgenden Formel:

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i - \hat{y}_i}{\hat{y}_i}$$

Kameradefekte, die während der Analysezeiträume zu Datenlücken führten, betrafen hauptsächlich die Standorte GO und MNW. Daher spielen die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen den Standorten in der ersten Analyse keine signifikante Rolle. Zukünftige Analysen werden ein besseres Verständnis der Verkehrsteilnehmer:innen und deren Verteilung in zeitlicher und räumlicher Hinsicht innerhalb des überwachten Bereichs ermöglichen. Dies wird auch Vergleiche von Verkehrsmustern zwischen den überwachten Straßen ermöglichen. Die Saisonalität der Verkehrsmuster kann ebenfalls genauer untersucht werden, wenn die restlichen Daten bis Mitte Dezember 2024 ausgewertet werden.

TABELLE 5. ERGEBNISSE DER VERGLEICHE ZWISCHEN DEN AUTOMATISCHEN OTANALYTICS-ZÄHLUNGEN UND MANUELLEN HANDZÄHLUNGEN. *DIESE BERECHNUNGEN WIEDERSPIEGELN DIE UNGENAUIGKEIT NACH START DER VERKEHRSZÄHLER UND SIND NICHT IN DEN DURCHSCHNITTSBERECHNUNGEN BERÜCKSICHTIGT.

Ort	Datum / Zeit	Bedingungen	Summe: PKW, LKW, Busse, Roller (OTAnalytics)	Summe: PKW, LKW, Busse, Roller (Handzählung)	Relativer Messabweichung (MPE) (Prozent)
MSO	26/03/2024 11:06-11:15	Klar	68	160	-57,5*
	26/03/2024 11:15-11:30	Klar	311	289	7,6
	03/04/2024 15:00-15:15	Klar	323	334	-3,3
	01/05/2024 19:45-20:00	Klar	326	333	-2,1
	17/06/2024 07:15-07:30	Klar	349	354	-1,4
Durchschnitt					0,2
GO	02/03/2024 12:00-12:15	Klar	156	157	-0,6
	01/04/2024 06:00-06:15	Klar	14	20	-30,0
	23/05/2024 19:04-19:15	Klar	102	139	-26,6*
	23/05/2024 19:15-19:30	Klar	220	210	4,8
	25/06/2024 16:30-16:45	Schatten	104	249	-58,2
Durchschnitt					-21
MNW	23/04/2024 20:00-20:15	Klar	257	288	-10,8
	24/05/2024 21:45-22:00	Regen	158	256	-38,3
	29/06/2024 14:45-15:00	Hell	262	261	0,4
Durchschnitt					-24,4
Gesamtdurchschnitt (Standardabweichung)					-12 (20)

3 Ergebnisse

3.1 Meteorologische Bedingungen

Tabelle 5 zeigt die vorherrschenden meteorologischen Bedingungen während der Messkampagne am Mehringdamm. Während die Temperatur vom Frühling bis zum Sommer anstieg und im Herbst wieder abnahm, blieben die durchschnittliche Windgeschwindigkeit und die relative Luftfeuchtigkeit weitgehend unverändert. Die vorherrschende Windrichtung war überwiegend Süd-Südwest, wobei einige Monate (März, Mai) eine Windrichtung aus Süd-Südost aufwiesen. Die monatliche Windrichtung ist in Abbildung 2 dargestellt. Eine weiterführende Analyse der meteorologischen Daten im Vergleich zu den Luftqualitätsparametern, insbesondere die Beziehung zwischen Windrichtung und Schadstoffkonzentration, wird in Abschnitt 3.2 präsentiert.

TABELLE 6. MONATLICHE DURCHSCHNITTSWERTE DER METEOROLOGISCHEN BEDINGUNGEN WÄHREND DER KAMPAGNE. DIE DATEN STAMMEN VON DER DWD-WETTERSTATION AM TEMPELHOFFER FELD.

Monat	Temperatur (°C)	Relative Feuchte (Prozent)	Windgeschwindigkeit (m/s)	Windrichtung (°)
März	8.5	73.1	3.5	162
April	11.9	66.2	3.7	201
Mai	17.6	61.5	3.5	146
Juni	18.7	65.8	3.3	212
Juli	20.3	65.8	3.0	210
August	21.7	62.1	3.2	197
September	19.6	61.0	4.3	189

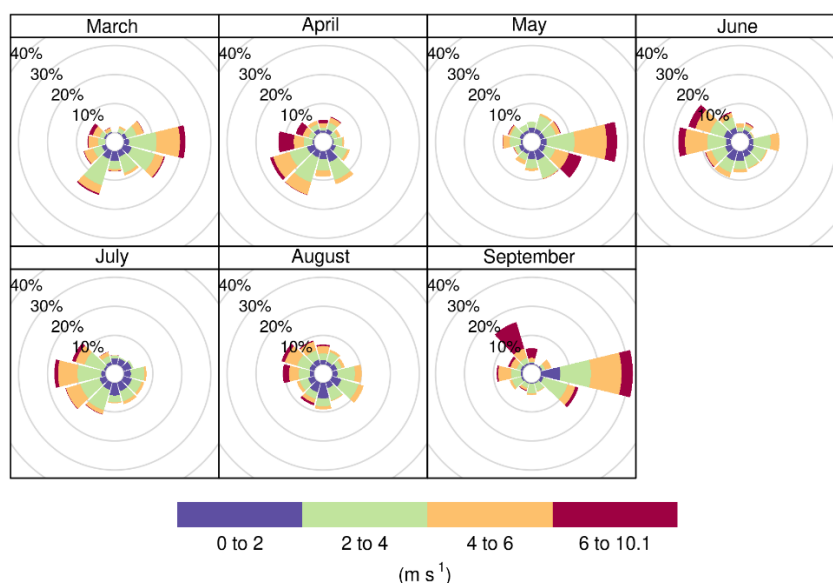


ABB. 2. VORHERRSCHENDE STÜNDLICHE WINDRICHTUNG UND WINDGESCHWINDIGKEIT AN DER DWD-WETTERSTATION TEMPELHOF NACH MONATEN GEORDNET

3.2 Luftqualitätsmessungen

Tabelle 6 gibt eine detaillierte Übersicht der monatlichen Durchschnittskonzentrationen der vier in dieser Studie gemessenen Luftschadstoffe – NO, NO₂, O₃ und PM_{2,5} – an den verschiedenen Standorten der Mehringdamm-Messstelle von März bis Oktober. Unsicherheitsbereiche sind für alle Messungen angegeben. Die Unsicherheitsbereiche für die gasförmigen Schadstoffe variieren erheblich zwischen den Zephyrs, was die sensorenspezifische Sensitivität der elektrochemischen Sensoren und die schnellen Konzentrationschwankungen (z. B. bei NO) widerspiegelt. Für die PM-Messungen mit Plantower-Sensoren ist die Variabilität zwischen den Sensoren geringer, was auf viel geringere Beiträge lokaler Emissionsquellen und stabilere Konzentrationen zurückzuführen ist.

Im Mittel sind die NO₂-Konzentrationen an den Messstellen Mehringdamm höher als an der Gneisenaustraße und Yorckstraße (Tabelle 6). Diese Unterschiede überschreiten jedoch nicht den Unsicherheitsbereich der Messungen. Die höchsten NO₂-Konzentrationen wurden am MNW gemessen. Bei allen Zephyrs war der Unsicherheitsbereich für die NO-Messungen sehr hoch, insbesondere am MNW, wo die höchsten NO-Konzentrationen gemessen wurden. Die höchsten und niedrigsten O₃-Konzentrationen wurden an YO oder MNW gemessen. Dies spiegelt den chemischen Zusammenhang zwischen NO/NO₂-Konzentrationen und der Bildung oder Zerstörung von O₃ wider. Die PM_{2,5}-Konzentrationen sind an allen fünf Standorten sehr ähnlich oder identisch, was die größere Anzahl von Quellen widerspiegelt, die zu PM_{2,5} beitragen sowie den eher regionalen Charakter der PM_{2,5}-Emissionen und die wichtige Rolle des Ferntransports für die lokalen PM_{2,5}-Konzentrationen. Im März wurden an allen Standorten erhöhte PM_{2,5}-Konzentrationen gemessen, was wahrscheinlich auf einen erheblichen Saharastaubtransport am Ende dieses Monats zurückzuführen ist. Abbildung 3 zeigt die täglichen Durchschnittskonzentrationen für alle vier Schadstoffe und bietet eine langfristige Übersicht über die Konzentrationen an jedem Standort, die mit den in Tabelle 6 dargestellten Werten übereinstimmt.

In Abbildung 4 sind für jeden Schadstoff und jeden Standort die tageszeitlichen Trends für Wochentage und -enden dargestellt. An allen fünf Standorten ist an Wochentagen ein deutlicher morgendlicher und abendlicher Spitzenwert der NO₂-Konzentration zu erkennen. Dies entspricht den Erwartungen für bekannte Muster der NO₂-Belastung in Städten und kann mit dem morgendlichen Berufsverkehr in Verbindung gebracht werden. In ähnlicher Weise sinken die O₃-Konzentrationen während des morgendlichen Berufsverkehrs, da hohe NO_x-Emissionen zu einer O₃-Zerstörung führen. Bei Sonnenaufgang beginnt die Photochemie und es kommt zu einer Netto-NO₂-Zerstörung sowie O₃-Bildung bis zum Abend, wenn die Photochemie bei Sonnenuntergang endet. Eine morgendliche Spitze der NO-Konzentrationen ist auch an Wochentagen zu beobachten und kann als robust angesehen werden, da alle fünf Zephyrs diese Spitze trotz hoher Unsicherheitsbereiche melden. An Wochenenden fehlt dieser Trend weitgehend, da es keinen morgendlichen Berufsverkehr gibt, der Spitzenwerte bei den NO_x-Konzentrationen verursacht. Die Trends bei den PM_{2,5}-Konzentrationen sind an Wochentagen und -enden weitgehend identisch mit höheren Konzentrationen in der Nacht und am Morgen sowie einem leichten Rückgang von Mittag bis zum frühen Abend.

TABELLE 7. MONATLICHE DURCHSCHNITTSWERTE DER LUFTSCHADSTOFFKONZENTRATIONEN FÜR JEDEN STANDORT AN DER MEHRINGDAMM-MESSSTELLE. UNSICHERHEITSBEREICHE SIND FÜR ALLE MESSUNGEN ANGEZEIGT, MIT AUSNAHME VON O₃, DA KALIBRIERUNGSDATEN VON EARTHSENSE VERWENDET WURDEN UND KEINE UNSICHERHEITSBEREICHE VERFÜGBAR SIND. ALLE KONZENTRATIONEN SIND IN µG/M³ ANGEZEIGT.

Ort	Monat	NO	NO Normalisiert	NO ₂	NO ₂ Normalisiert	O ₃	O ₃ Normalisiert	PM _{2,5}	PM _{2,5} Normalisiert
GO	März	23 ± 25	17	24 ± 8	6	44 ± 5	-4	19 ± 3	0
	April	20 ± 26	15	22 ± 8	6	52 ± 6	-12	9 ± 2	0
	Mai	17 ± 26	13	19 ± 8	7	64 ± 6	-9	11 ± 2	1
	Juni	21 ± 25	17	25 ± 8	13	53 ± 6	-14	12 ± 2	0
	Juli	22 ± 25	17	24 ± 8	11	56 ± 6	-3	10 ± 2	1
	August	20 ± 25	16	24 ± 8	11	60 ± 6	-5	11 ± 2	1
	September	23 ± 25	19	22 ± 8	10	59 ± 6	-6	12 ± 2	0
	Oktober	29 ± 24	23	26 ± 8	11	32 ± 5	-4	11 ± 2	1
	Durchschnitt	22 ± 25	17	23 ± 8	9	53 ± 6	-7	12 ± 2	1
MNW	März	26 ± 18	18	28 ± 6	10	39 ± 5	-8	18 ± 2	0
	April	29 ± 21	23	34 ± 7	17	40 ± 5	-21	11 ± 2	1
	Mai	24 ± 45	19	23 ± 7	12	64 ± 6	-9	12 ± 2	2
	Juni	33 ± 28	28	40 ± 7	27	43 ± 6	-23	13 ± 2	2
	Juli	31 ± 37	26	32 ± 8	19	51 ± 6	-9	11 ± 2	3
	August	29 ± 42	25	30 ± 8	17	56 ± 6	-9	11 ± 2	2
	September	25 ± 38	20	25 ± 7	12	55 ± 6	-9	14 ± 2	1
	Oktober	24 ± 21	17	28 ± 6	12	29 ± 5	-7	11 ± 2	1
	Durchschnitt	28 ± 31	26	30 ± 7	19	47 ± 6	-33	13 ± 2	2
MSO	März	25 ± 14	18	27 ± 7	9	43 ± 5	-4	18 ± 2	0
	April	19 ± 15	14	25 ± 7	9	52 ± 5	-11	9 ± 2	0
	Mai	18 ± 14	13	25 ± 7	13	62 ± 6	-10	11 ± 2	1
	Juni	14 ± 15	10	21 ± 7	9	62 ± 6	-6	12 ± 2	1
	Juli	15 ± 14	11	25 ± 7	12	55 ± 5	-5	9 ± 2	1
	August	15 ± 14	10	25 ± 7	13	56 ± 5	-9	11 ± 2	1
	September	19 ± 14	14	27 ± 7	14	49 ± 5	-16	13 ± 2	1
	Oktober	25 ± 14	19	29 ± 7	14	27 ± 4	-10	11 ± 2	1
	Durchschnitt	19 ± 14	14	26 ± 7	12	51 ± 5	2	12 ± 2	1
MSW	März	22 ± 6	15	26 ± 7	8	42 ± 5	-6	16 ± 2	-2
	April	22 ± 7	16	30 ± 7	14	46 ± 5	-16	9 ± 2	0
	Mai	12 ± 8	7	21 ± 7	9	63 ± 6	-10	2 ± 2	1
	Juni	21 ± 7	17	35 ± 7	24	47 ± 6	-21	13 ± 2	0
	Juli	29 ± 7	24	25 ± 5	13	54 ± 5	0	9 ± 2	1
	August	19 ± 9	15	25 ± 5	12	58 ± 5	-8	11 ± 3	2
	September	15 ± 9	11	24 ± 5	11	54 ± 5	-11	14 ± 3	1
	Oktober	19 ± 9	13	27 ± 4	12	29 ± 4	-7	11 ± 2	1
	Durchschnitt	20 ± 8	15	26 ± 6	13	49 ± 5	-15	12 ± 2	1
YW	März	21 ± 11	14	25 ± 7	7	41 ± 5	-7	18 ± 3	0
	April	18 ± 11	12	26 ± 7	10	48 ± 5	-15	10 ± 2	1
	Mai	12 ± 12	8	22 ± 7	10	62 ± 6	-10	11 ± 2	1
	Juni	12 ± 12	7	21 ± 7	9	62 ± 6	-6	13 ± 2	1
	Juli	12 ± 12	8	23 ± 7	11	56 ± 6	-4	9 ± 2	1
	August	10 ± 12	6	21.5 ± 7	9	62 ± 6	-4	10 ± 2	1
	September	11 ± 12	7	20.5 ± 7	7	57 ± 6	-8	13 ± 2	0
	Oktober	18 ± 11	12	24 ± 7	9	30 ± 4	-7	11 ± 2	1
	Durchschnitt	14 ± 12	9	23 ± 7	9	52 ± 6	10	12 ± 2	1

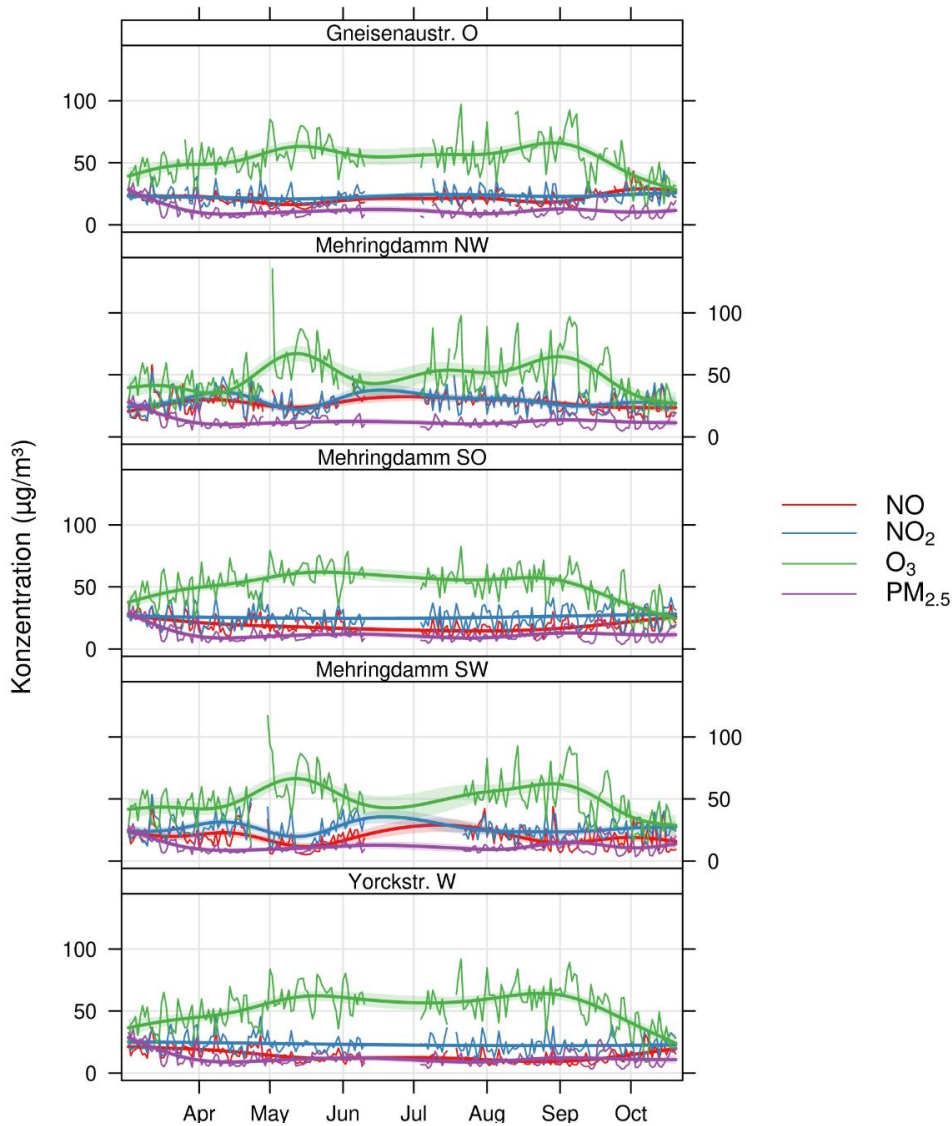


ABB. 3. TÄGLICHE DURCHSCHNITTSKONZENTRATIONEN FÜR NO, NO₂, O₃ UND PM_{2.5} AN JEDEM STANDORT. EINE GEGLÄTTETE LINIE DER BESTEN ANPASSUNG WURDE HINZUGEFGT, UM ALLGEMEINE TRENDS IM LAUFE DER ZEIT AUFZUZEIGEN. DIE SCHATTIERUNG UM DIE GEGLÄTTETE LINIE ZEIGT DAS 95-PROZENT-KONFIDENZINTERVALL DER GEGLÄTTETEN ANPASSUNG AN. DIE DATENLÜCKE VON MITTE JUNI BIS ANFANG JULI IST AUF EINEN STANDORTWECHSEL ZURÜCKZUFÜHREN.

Bei der Betrachtung der normalisierten Werte, wie sie in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt sind, werden die lokalen Beiträge der einzelnen Schadstoffe recht deutlich. Für NO und NO₂ gibt es an allen Standorten einen signifikanten lokalen Beitrag zu den gemessenen Konzentrationen, der an MNW am höchsten ist. Für beide Schadstoffe entsprechen die lokalen Beiträge den an den einzelnen Standorten gemessenen tageszeitlichen Verkehrsmustern, wobei die lokalen Konzentrationen bei anhaltendem Verkehrsaufkommen den ganzen Tag über kontinuierlich ansteigen (Abbildungen 9 und 10), insbesondere an MNW und MSO. An GO und YW ist der lokale Beitrag zu den NO₂-Werten am geringsten, was mit den geringeren Verkehrszahlen übereinstimmt, die an diesen Straßen gemessen wurden. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, gibt es auch eine beträchtliche Anzahl von extremen Konzentrationen (> 40 µg/m³), die an jedem Standort gemessen wurden und auf lokale Emissionen zurückgeführt werden können. Bei O₃ ist der Trend umgekehrt, was darauf hinweist, dass am Mehringdamm eine NO_x-Titration von O₃ stattfindet. Die negativen normalisierten O₃-Konzentrationen sind ein weiterer Beweis dafür, dass es hohe lokale NO_x-Emissionen gibt, die zur Zerstörung von O₃ und zur Produktion von NO₂ führen. Am deutlichsten ist dies tagsüber, da die O₃-Konzentrationen normalerweise mit der Photolyse von NO₂, die zur O₃-Produktion führt, ansteigen sollten, aber stattdessen sind die normalisierten O₃-Konzentrationen an allen Standorten unterdrückt. Dies untermauert die Schlussfolgerung, dass es an allen fünf Messstandorten erhebliche lokale NO_x-Emissionen gibt, die weit über die Werte des städtischen Hintergrunds hinausgehen. Für PM_{2.5} gibt es fast keinen lokalen Beitrag, was darauf hindeutet, dass die lokal gemessenen Konzentrationen den allgemeinen städtischen Hintergrund und die Beiträge des Fernverkehrs widerspiegeln.

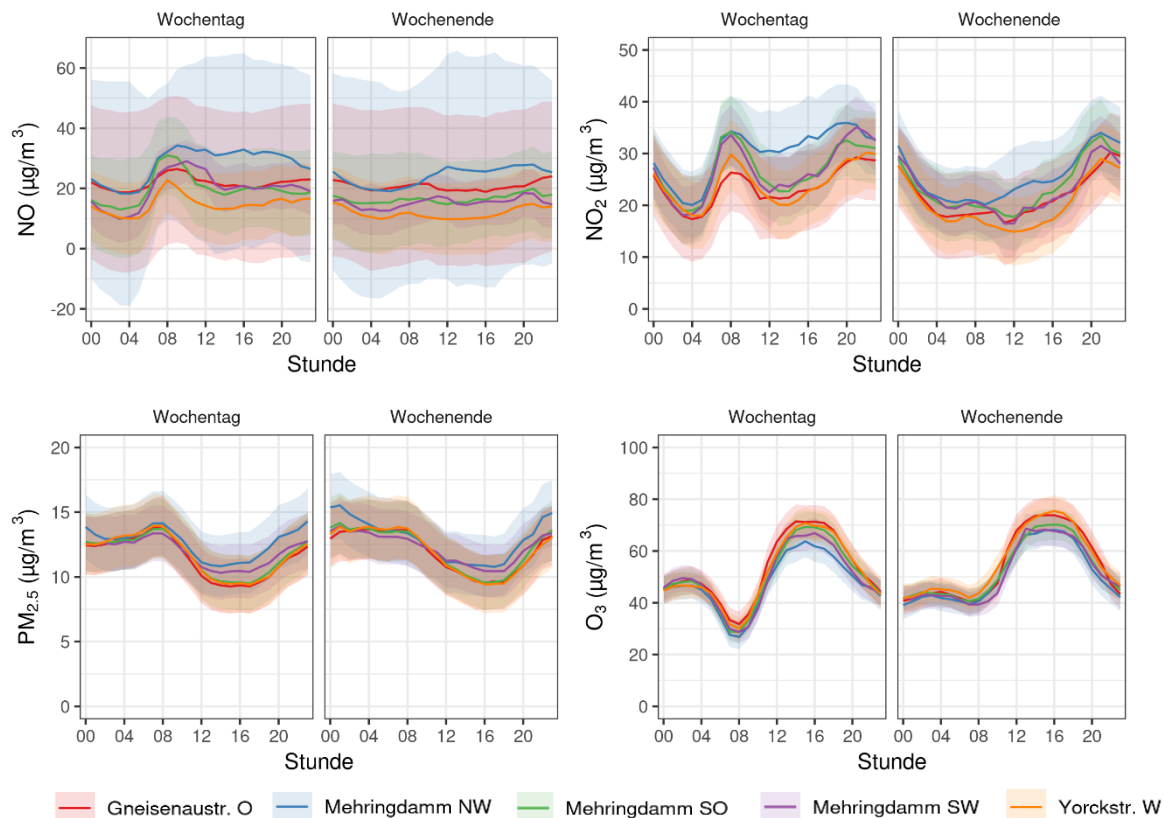


ABB. 4. STÜNDLICHE DURCHSCHNITTSWERTE FÜR NO, NO₂, O₃ UND PM_{2,5} FÜR DIE GESAMTE KAMPAGNE (MÄRZ-OCTOBER) NACH WOCHENTAGEN UND WOCHENENDEN. DIESE DIURNALEN DIAGRAMME ZEIGEN TÄGLICHE TRENDS DER LUFTVERSCHMUTZUNG AN JEDEM STANDORT.

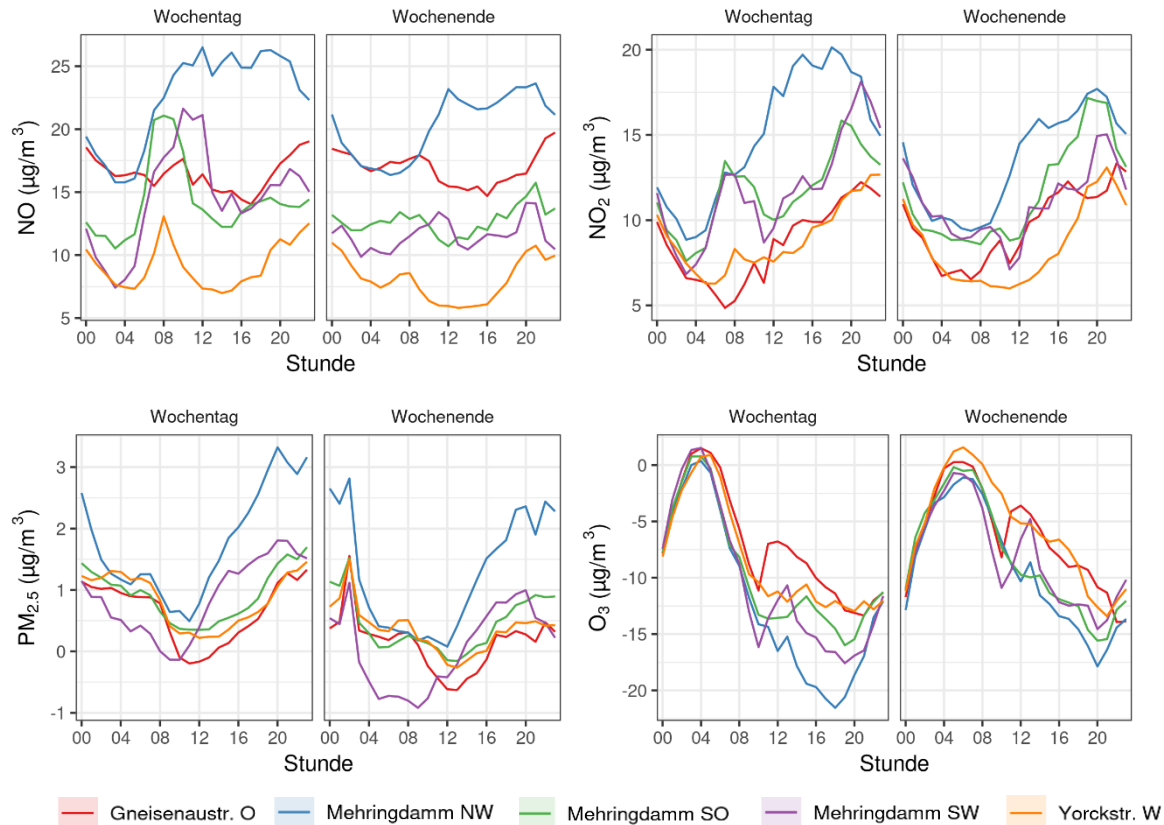


ABB. 5. DURCHSCHNITTLICHE STÜNDLICHE NO-, NO₂-, O₃- UND PM_{2,5}-KONZENTRATIONEN AN WOCHENTAGEN UND WOCHENENDEN, NORMIERT AUF DIE DURCHSCHNITTLICHEN STÄDTISCHEN HINTERGRUNDKONZENTRATIONEN, GEORDNET NACH MESSSTELLEN.

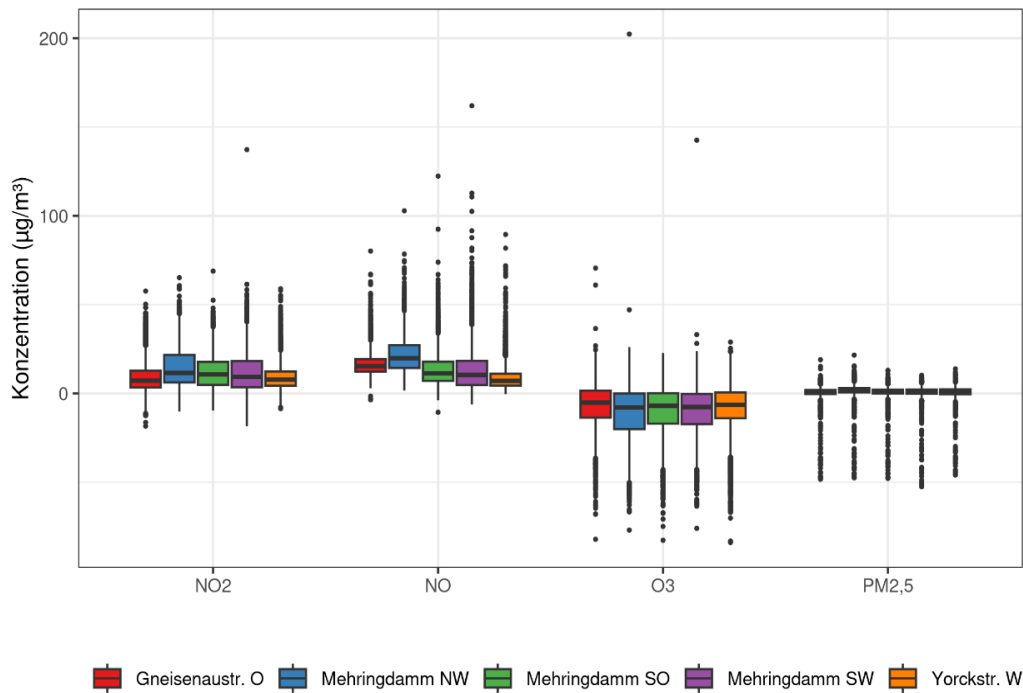


ABB. 6. BOXPLOTS DER DURCHSCHNITTLICHEN STÜNDLICHEN NO-, NO₂-, O₃- UND PM_{2,5}-KONZENTRATIONEN, NORMIERT AUF DIE DURCHSCHNITTLICHEN STÄDTISCHEN HINTERGRUNDKONZENTRATIONEN UND GEORDET NACH MESSSTANDORT

Abbildung 7 zeigt dieselben stündlichen Konzentrationen als Funktion der Windrichtung, wobei die Windrosen für jeden Schadstoff auf der vorherrschenden Windrichtung basieren und nach Konzentrationsbereichen geordnet sind. Für PM_{2,5} ist die Beziehung zwischen Windrichtung und Konzentration an allen fünf Standorten fast gleich. Dies unterstreicht die Bedeutung des allgemeinen städtischen Hintergrunds und des regionalen Transports für die lokalen PM_{2,5}-Konzentrationen an der Messstelle Mehringdamm. Für die Gasphasenschadstoffe gibt es jedoch Hinweise auf einen Einfluss der vorherrschenden Windrichtung auf die lokalen Konzentrationen. Dies ist vor allem an den Messstandorten am Mehringdamm zu beobachten, weniger an YW und GO. Bei MSW und MNW sind bei vorherrschender westlicher Windrichtung (zwischen SW und NW) die gemessenen NO_x-Konzentrationen höher, während die O₃-Konzentrationen niedriger sind. Bei MSO sind die Verhältnisse bei vorherrschender östlicher Windrichtung (zwischen SE und NE) umgekehrt. Angesichts der typischen Straßenschlucht-Topologie des Mehringdamms können vorherrschende Winde aus bestimmten Richtungen zur Bildung von Wirbelströmungen führen, die die Verschmutzung auf bestimmten Seiten der Straße abfangen (siehe Schmitz et al., 2023), was durch diese Ergebnisse unterstützt wird. An den Standorten YW und GO ist dieser Zusammenhang nicht so eindeutig, da der Wind in Berlin normalerweise nicht aus nördlichen oder südlichen Richtungen kommt. Darüber hinaus führt ein geringeres Verkehrsaufkommen in der Regel zu niedrigeren NO_x-Emissionen an diesen Standorten, und da die Straßen eine andere Topologie haben, weisen sie wahrscheinlich auch andere Verkehrsmuster auf. Um diese Ergebnisse zu bestätigen, wären jedoch Studien zur Modellierung von Stadtstraßen erforderlich.

In Abbildung 8 werden die mit Passivsammlern gemessenen NO₂-Konzentrationen mit den Zephyr-Daten am MSW verglichen. In den meisten Fällen überschneiden sich die mit den verschiedenen Geräten gemessenen Konzentrationen innerhalb ihrer Unsicherheitsbereiche. Da Passivsammler dazu neigen, ein leichtes positives Bias zu zeigen, scheint die Übereinstimmung zwischen den beiden Messmethoden am MSW-Standort sehr gut zu sein. Aufgrund einer Co-Lokation im Juni und eines Fehlers des Zephyrs (z543), der am MSW-Standort stationiert war, gab es jedoch eine signifikante Datenlücke. Insgesamt deutet diese Analyse darauf hin, dass die Zephyrs und Passivsammler relativ gut mit ihren jeweiligen Messungen übereinstimmen.

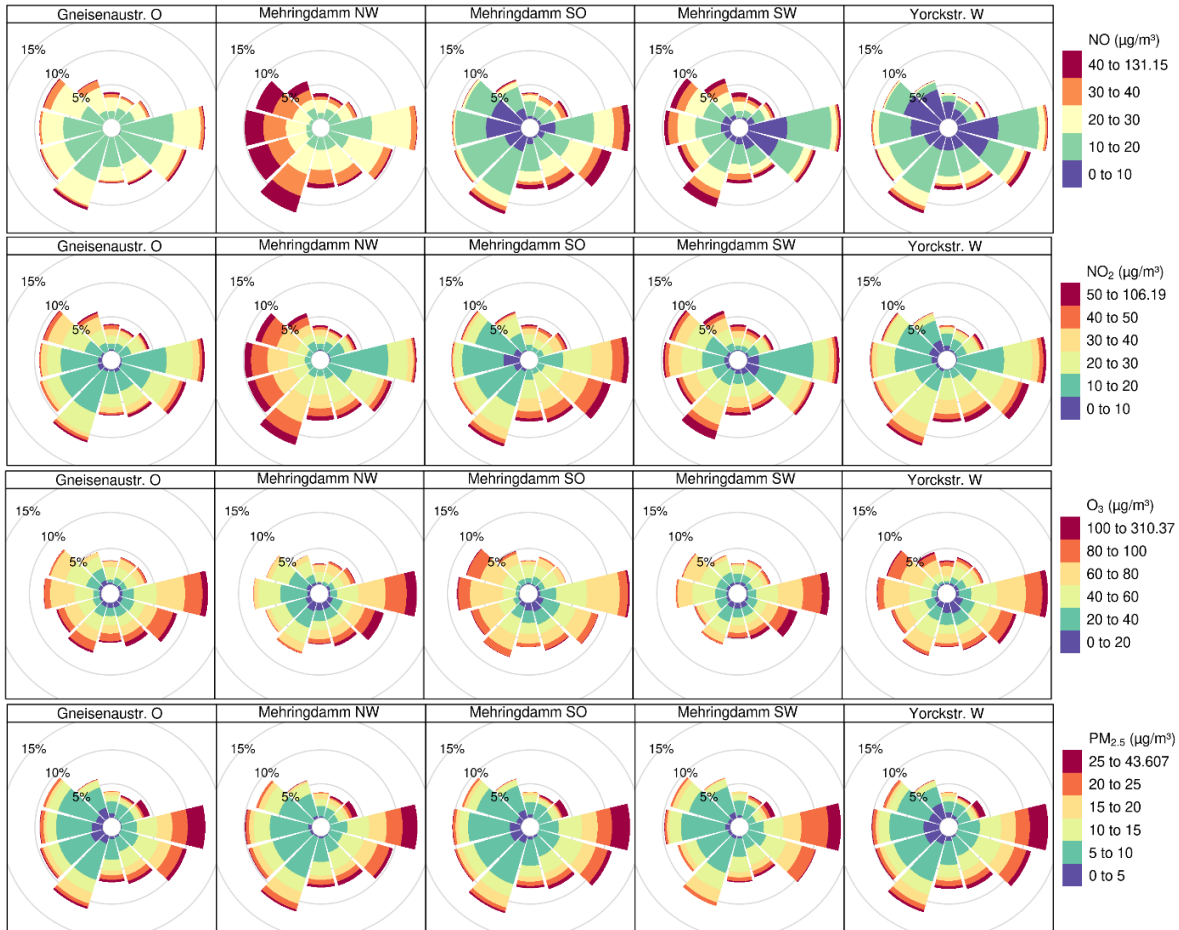


ABB. 7. STÜNDLICHE DURCHSCHNITTSWERTE DER KONZENTRATIONEN VON NO, NO₂, O₃ UND PM_{2,5} IN FORM VON WINDROSEN, BASIEREND AUF DEN WINDRICHTUNGSDATEN DER DWD-WETTERSTATION TEMPELHOF. DIE WINDROSEN ZEIGEN DIE VERTEILUNG DER SCHADSTOFF-KONZENTRATIONEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER VORHERRSCHENDEN WINDRICHTUNG, DIE IN KONZENTRATIONSBEREICHE UNTERTEILT IST.

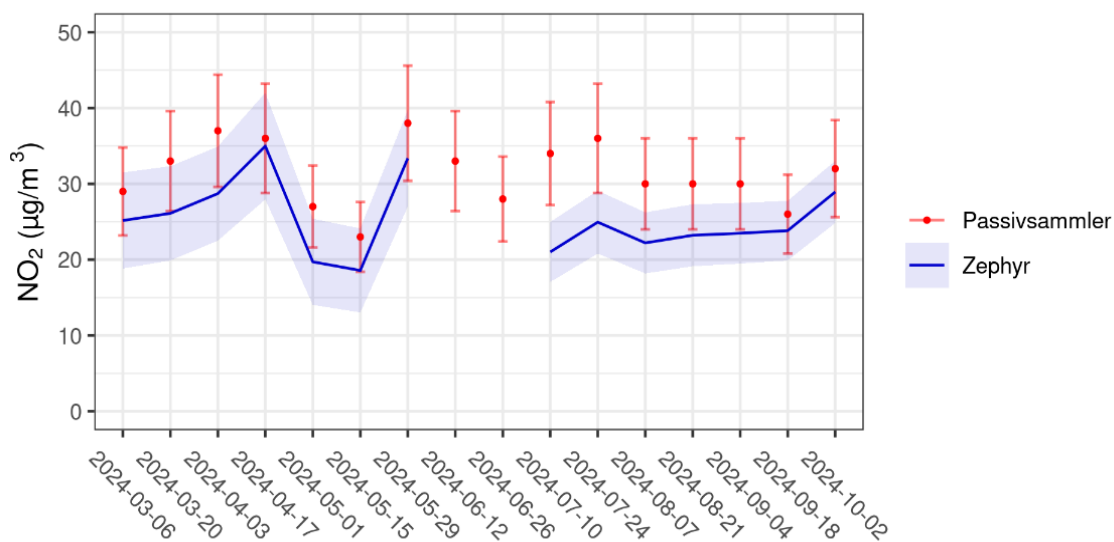


ABB. 8. VERGLEICH DER NO₂-KONZENTRATIONEN, DIE MIT PASSIVSAMMLERN GEMESSEN WURDEN, MIT DEN ZEPHYR-DATEN AM MSW-STANDORT BEI EINER ZWEIWÖCHIGEN AUFLÖSUNG. UNSICHERHEITSBEREICHE FÜR DIE PASSIVSAMMLER SIND ENTHALTEN UND REPRÄSENTIEREN EINE UNSICHERHEIT VON 20 PROZENT DER MESSUNG. DER ZEITRAUM VON ZWEI WOCHEN BEGINNT AM ANGEGEBENEN DATUM.

3.3 Verkehrszählungen

Die Abbildungen 7-9 und die Tabellen 7 und 8 fassen die Ergebnisse der Verkehrszählungen zusammen, die zwischen März und Juni 2024 an drei Standorten am Standort Mehringdamm (MSO, MNW, GO) durchgeführt wurden. In Abbildung 7 sind tageszeitliche Diagramme der durchschnittlichen stündlichen Verkehrszählungen über diese vier Monate für Wochentage und Wochenenden dargestellt. Bei GO ist ein deutlicherer Unterschied zwischen den morgendlichen und abendlichen Zählungen festzustellen, der mit einer Verringerung des Verkehrsaufkommens zusammenhängt. Insgesamt sind die stündlichen Zählungen an GO niedriger als die von MSO und MNW, liegen aber in einem ähnlichen Bereich. Alle drei Standorte weisen ähnliche Trends beim Lkw-Verkehr auf, mit Spitzenwerten zwischen 06:00 und 12:00 Uhr und einem deutlichen Rückgang nach 14:00 Uhr. An Wochenenden erreicht der morgendliche Verkehr seinen Höhepunkt erst zwischen 10:00 und 12:00 Uhr, was mit den fehlenden Spitzen und Einbrüchen bei den NO_x- bzw. O₃-Konzentrationen übereinstimmt. Nach dem langsameren morgendlichen Anstieg der Verkehrszahlen sind die stündlichen Wochenenddurchschnittswerte fast identisch mit den stündlichen Durchschnittswerten an Wochentagen. Dies zeigt sich auch in Abbildung 8 und Tabelle 7, wo die durchschnittlichen täglichen Gesamtzahlen für Pkw unabhängig vom Wochentag sehr ähnlich sind. Beide Abbildungen zeigen, dass die Zahl der Lkw am Wochenende deutlich zurückgeht und an allen Standorten sonntags sehr niedrig ist. Von allen Standorten weist MSO die höchsten Zählungen von Pkw und Lkw auf. Insgesamt scheint der Mehringdamm eine höhere Verkehrsbelastung zu haben als die Gneisenaustraße und Yorckstraße.

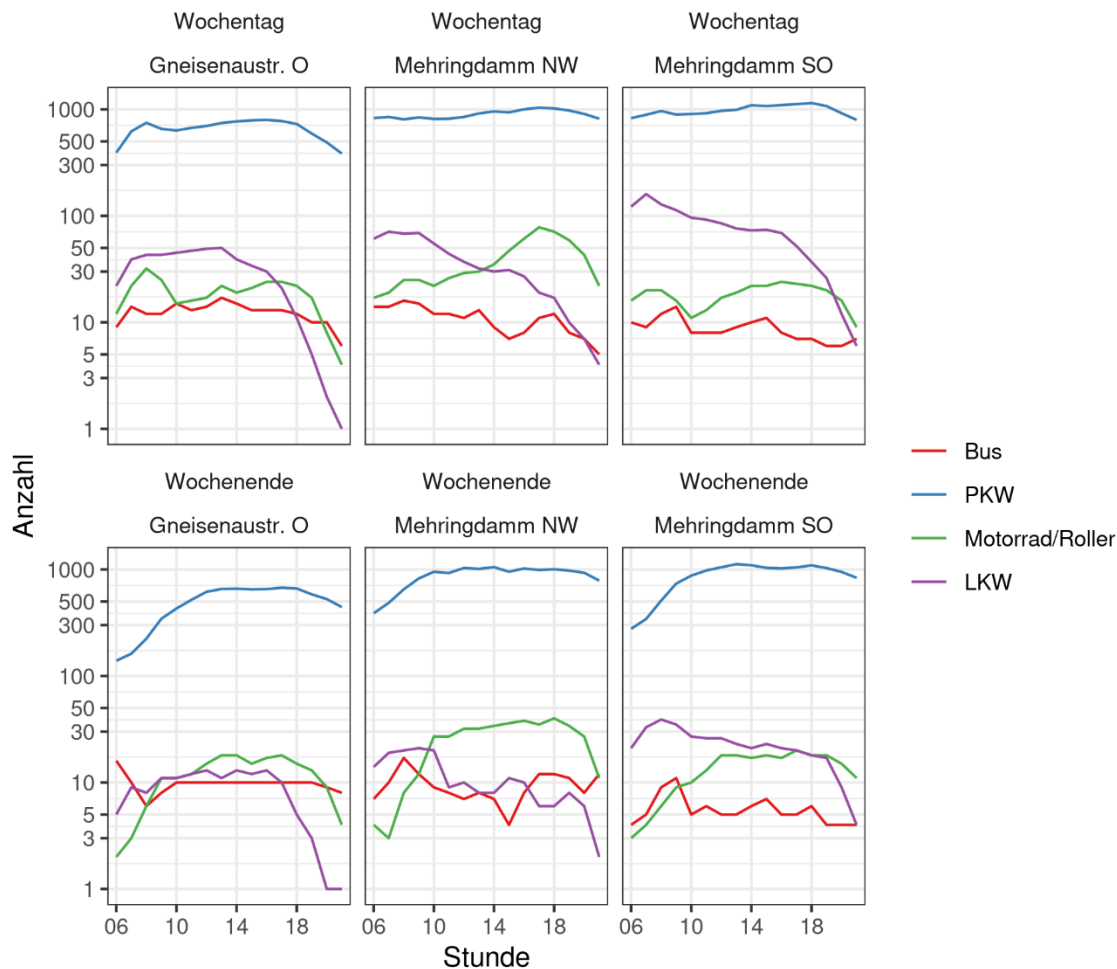


ABB. 9. DURCHSCHNITTliche STÜNDliche ZÄHlungen von PKW, LKW, Bussen und Motorrädern an Wochentagen und Wochenenden während der gesamten Kampagne (März-Juni, soweit Daten verfügbar waren). Zu beachten ist, dass die Y-Achse auf einer logarithmischen Skala abgebildet ist.

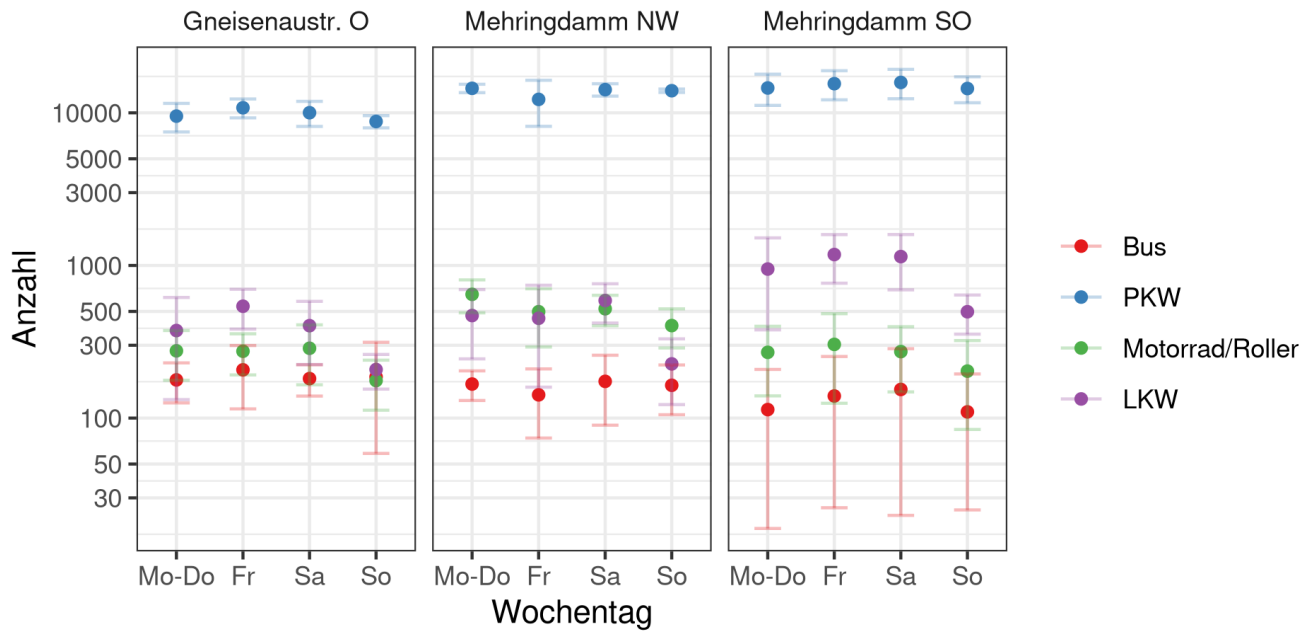


ABB. 10. DURCHSCHNITTLLICHE TÄGLICHE GESAMTZAHLEN VON PKW, LKW, BUSSEN UND MOTORRÄDERN WÄHREND DER GESAMTEN KAMPAGNE (MÄRZ-JUNI) FÜR MONTAG-DONNERSTAG, FREITAG, SAMSTAG UND SONNTAG. ZU BEACHTEN IST, DASS DIE Y-ACHSE AUF EINER LOGARITHMISCHEN SKALA DARGESTELLT IST. DIE BALKEN STELLEN EINE STANDARDABWEICHUNG ÜBER UND UNTER DEM DURCHSCHNITTLLICHEN TAGESWERT DAR.

TABELLE 8. DURCHSCHNITTLLICHE TÄGLICHE GESAMTZAHLEN VON PKW, LKW, Bussen UND MOTORRÄDERN WÄHREND DER GESAMTEN KAMPAGNE (MÄRZ-JUNI) FÜR VERSCHIEDENE WOCHENTAGE. DIESE BEZIEHEN SICH AUF NUR EINE FAHRT-RICHTUNG. DIESE WERTE ENTSPRECHEN DEN IN ABBILDUNG 10 DARGESTELLTEN WERTEN.

Wochentag	Ort	Fahrtrichtung	PKW	LKW	Bus	Motorrad
Mo-Do	Gneisenaustr. O	West → Ost	9514	375	178	276
	Mehringdamm NW	Nord → Süd	14472	470	167	647
	Mehringdamm SO	Süd → Nord	14550	947	114	270
Fr	Gneisenaustr. O	West → Ost	10797	541	207	274
	Mehringdamm NW	Nord → Süd	12250	451	142	498
	Mehringdamm SO	Süd → Nord	15524	1179	140	304
Sa	Gneisenaustr. O	West → Ost	10018	403	181	287
	Mehringdamm NW	Nord → Süd	14188	589	174	520
	Mehringdamm SO	Süd → Nord	15818	1143	154	273
Su	Gneisenaustr. O	West → Ost	8778	208	186	176
	Mehringdamm NW	Nord → Süd	13962	227	164	404
	Mehringdamm SO	Süd → Nord	14429	497	110	203

4 Fazit

In diesem Bericht werden die Zwischenergebnisse der Vermessung der Luftqualität und des Verkehrs an der Kreuzung von Mehringdamm, Gneisenaustraße und Yorckstraße in Berlin zwischen März und Oktober 2024 (zwischen März und Juni für die Verkehrsdaten) dargestellt. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Berichts sind noch nicht alle verfügbaren Messdaten ausgewertet, daher können noch keine endgültigen Schlussfolgerungen gezogen werden. Für die Auswertung der verbleibenden Daten wird mehr Zeit benötigt und es müssen weitere Analysen durchgeführt werden. Es gibt jedoch einige interessante Zwischenergebnisse, die in diesem Bericht vorgestellt wurden.

Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Luftqualität am Mehringdamm schlechter ist als an Yorck- und Gneisenaustraße, aber nur geringfügig. Erste Ergebnisse deuten zudem auf starke lokale Beiträge von NO und NO₂ zu den gemessenen Gesamtkonzentrationen, was zu einer Unterdrückung der lokalen O₃-Konzentrationen führt. Am deutlichsten ist dies am MNW-Standort, wo die höchsten NO_x-Konzentrationen gemessen wurden. Die Ergebnisse deuten auf einen Einfluss der Windrichtung auf die lokalen NO_x- und O₃-Konzentrationen am Mehringdamm hin, wobei die NO_x- und O₃-Konzentrationen auf beiden Seiten der Straße je nach vorherrschender Windrichtung höher oder niedriger sind. Für NO_x und O₃ sind klare, erwartete tageszeitliche Verschmutzungsmuster zu erkennen, obwohl die Unsicherheitsbereiche für NO bei den meisten Zephyr-Geräten sehr groß sind. Sowohl die Größenordnung dieser lokal gemessenen NO_x- und O₃-Konzentrationen als auch Ergebnisse anderer wissenschaftlicher Veröffentlichungen legen nahe, dass die geplanten Maßnahmen zur Änderung der Lichtsignalanlage an dieser Kreuzung zielführend sein könnten, um Staus zu reduzieren und die lokale Luftqualität zu verbessern. Weitere Messungen könnten den Effekt der Umsetzung der Maßnahmen quantifizieren. Die Exposition von Fußgänger:innen gegenüber schlechter Luftqualität könnten anhand künftiger Messkampagnen darüber hinaus quantifiziert werden. Das Autoren-Team schlägt hierfür zusätzliche Messungen vor und nach der Umsetzung der Änderungen der Lichtsignalanlage vor..

Unsere Messungen deuten darauf hin, dass die lokalen NO₂-Konzentrationen zwar den derzeit gesetzlich zulässigen Jahresgrenzwert von 40 µg/m³ einhalten, aber wahrscheinlich nicht den bevorstehenden Grenzwert von 20 µg/m³. Diese Ergebnisse werden sowohl von den EarthSense-Zephyr-Luftqualitätsinstrumenten als auch von den Passam-Passivsammlern gestützt, die in dieser Studie verwendet wurden. Die Messungen unterliegen jedoch erheblichen Unsicherheitsbereichen und können daher nur als indikativ betrachtet werden.

Bei PM_{2,5} wurden über den gesamten Verlauf der Kampagne keine Unterschiede in den Konzentrationen zwischen den verschiedenen Messorten festgestellt. Unabhängig von der vorherrschenden Windrichtung bleiben die an den fünf Standorten gemessenen PM_{2,5}-Konzentrationen ähnlich. Dies lässt die Folgerung zu, dass die lokalen PM_{2,5}-Konzentrationen vor allem durch städtische und regionale Hintergrundquellen für Feinstaub beeinflusst werden. Ein Beispiel für den Einfluss von Ferntransport sind die erhöhten Konzentrationen, die im März 2024 gemessen wurden und mit einem großen Saharastaub-Ereignis zusammenfielen, das Ende des Monats in Berlin stattfand.

Die Ergebnisse der Verkehrszählungen zeigen, dass der Mehringdamm ein höheres Pkw- und Lkw-Verkehrsaufkommen aufweist als die Gneisenaustraße, wo zwischen März und Juni 2024 Messungen mit OTC-Kameras zur Verfügung standen. An Wochentagen bleibt das Pkw-Aufkommen auf dem Mehringdamm über den Tag hinweg konstant, während es in der Gneisenaustraße abends zu einem Rückgang der Verkehrszahlen und morgens zu einem langsameren Anstieg kommt. An den Wochenenden ist das gesamte Pkw-Verkehrsaufkommen an allen Standorten fast identisch mit dem werktäglichen Aufkommen, doch dauert es am Morgen länger, bis der Spitzenwert erreicht wird. Die Anzahl an Lastkraftwagen nimmt am Wochenende gegenüber den Wochentagen und am späten Nachmittag und Abend gegenüber dem frühen Morgen bis zum Nachmittag an allen Standorten deutlich ab.

5 Literaturverzeichnis

De Coensel, B., Can, A., Degraeuwe, B., De Vlieger, I., & Botteldooren, D. (2012). Effects of traffic signal coordination on noise and air pollutant emissions. *Environmental Modelling & Software*, 35, 74-83. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.02.009>

Hafkenscheid, T., Fromage-Mariette, A., Goelen, E., Hangartner, M., Pfeffer, U., Plaisance, H., de Santis, F., Saunders, K., Swaans, W., Tang, Y. S., Targa, J., van Hoek, C., & Gerboles, M. (2009). Review of the application of diffusive samplers in the European Union for the monitoring of nitrogen dioxide in ambient air.

Kim, K. H., Lee, S.-B., Woo, S. H., & Bae, G.-N. (2014). NO_x profile around a signalized intersection of busy roadway. *Atmospheric Environment*, 97, 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.012>

Kwak, K.-H., Woo, S., Kim, K., Lee, S.-B., Bae, G.-N., Ma, Y.-I., Sunwoo, Y., & Baik, J.-J. (2018). On-Road Air Quality Associated with Traffic Composition and Street-Canyon Ventilation: Mobile Monitoring and CFD Modeling. *Atmosphere*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/atmos9030092>

Liora, N., Poupkou, A., Kontos, S., Meleti, C., Chrysostomou, K., Aifadopoulou, G., Zountsa, S., Kalogirou, C., Chacartegui, R., Liguori, F., Bressan, M., Almeida, S. M., & Melas, D. (2021). Estimating Road Transport Pollutant Emissions Under Traffic-Congested Conditions with an Integrated Modelling Tool—Emissions Reduction Scenarios Analysis. *Emission Control Science and Technology*, 7(2), 137-152. <https://doi.org/10.1007/s40825-021-00191-5>

Madireddy, M., De Coensel, B., Can, A., Degraeuwe, B., Beusen, B., De Vlieger, I., & Botteldooren, D. (2011). Assessment of the impact of speed limit reduction and traffic signal coordination on vehicle emissions using an integrated approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(7), 504-508. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.06.001>

Schmitz, S., Towers, S., Villena, G., Caseiro, A., Wegener, R., Klemp, D., Langer, I., Meier, F., & von Schneidemesser, E. (2021). Unravelling a black box: an open-source methodology for the field calibration of small air quality sensors. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(11), 7221-7241. <https://doi.org/10.5194/amt-14-7221-2021>

Schmitz, S., Villena, G., Caseiro, A., Meier, F., Kerschbaumer, A., & von Schneidemesser, E. (2023). Calibrating low-cost sensors to measure vertical and horizontal gradients of NO₂ and O₃ pollution in three street canyons in Berlin. *Atmospheric Environment*, 307, 119830. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119830>

Schroeder, A. K., Woodward, H., Le Cornec, C. M. A., Proust, T., Benie, P. J., Fan, S., Aristodemou, E., Jones, R. L., Linden, P. F., de Nazelle, A., Boies, A. M., & Stettler, M. E. J. (2024). Vehicle emission models alone are not sufficient to understand full impact of change in traffic signal timings. *Atmospheric Environment: X*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2024.100293>

Stahlmann, R., Möller, M., Brauer, A., German, R., & Eckhoff, D. (2018). Exploring GLOSA systems in the field: Technical evaluation and results. *Computer Communications*, 120, 112-124. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2017.12.006>

Suramardhana, T. A., & Jeong, H. Y. (2014). A driver-centric green light optimal speed advisory (DC-GLOSA) for improving road traffic congestion at urban intersections. *Proceedings, APWiMob 2014: IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile*, 2014.

Am Forschungsinstitut für Nachhaltigkeit (RIFS) werden Entwicklungspfade für die globale Transformation zu einer nachhaltigen Gesellschaft erforscht, aufgezeigt und unterstützt. Das Institut ist an das GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung angebunden und damit Teil der Helmholtz-Gemeinschaft. Der Forschungsansatz ist transdisziplinär, transformativ und ko-kreativ: Das RIFS kooperiert mit Partnern aus Wissenschaft, Politik und Verwaltung, Wirtschaft und Zivilgesellschaft, um die Probleme nachhaltiger Entwicklung zu verstehen, geeignete Lösungen zu finden und diese gemeinsam mit relevanten Akteuren und betroffenen Bürgerinnen und Bürgern umzusetzen. Zentrale Forschungsthemen sind unter anderem Energiewende, Klimawandel und soziotechnischer Wandel, aber auch Fragen der nachhaltigen Governance und Partizipation. Ein starkes nationales und internationales Netzwerk verbunden mit einem Fellow-Programm unterstützen das Institut.

RIFS Study

Dezember 2024

Kontakt:

Seán Schmitz: sean.schmitz@rifs-potsdam.de

Erika von Schneidemesser: erika.von.schneidemesser@rifs-potsdam.de

Adresse:

Berliner Straße 130
14467 Potsdam

T: +49 (0) 331-28822-340

F: +49 (0) 331-28822-310

media@rifs-potsdam.de

www.rifs-potsdam.de

ViSdP:

Prof. Dr. Mark G. Lawrence,
Wissenschaftlicher Direktor, Sprecher

Redaktion:

Damian Harrison

Sabine Letz

DOI: [10.48481/rifs.2024.024](https://doi.org/10.48481/rifs.2024.024)

