



LAND
BRANDENBURG

Ministerium für Landwirtschaft,
Umwelt und Klimaschutz

Immissionsschutz



Profilmessungen mit NO₂-Passivsammlern in Brandenburg an der Havel (2018 - 2019)



Landesamt für Umwelt

Herausgeber

Ministerium für Landwirtschaft,
Umwelt und Klimaschutz (MLUK)
Referat Öffentlichkeitsarbeit
Henning-von-Tresckow-Straße 2-13, Haus S, 14467 Potsdam
Telefon: +49 (0)331 866-7237
E-Mail: bestellung@mluk.brandenburg.de
Internet: mluk.brandenburg.de oder www.agrar-umwelt.brandenburg.de

Redaktion

Landesamt für Umwelt (LfU)
Abteilung Technischer Umweltschutz 1
Referat T14 – Luftqualität, Klima, Nachhaltigkeit
Seeburger Chaussee 2, 14476 Potsdam
Telefon: +49 (0)33201 442-0
E-Mail: infoline@lfu.brandenburg.de
Internet: lfu.brandenburg.de

Fotos

Titel: © Hannes Brauer
Fotos zur Messstellenbeschreibung, S.11, 13, 14: © Landesamt für Umwelt, Referat T 14

Satz

LGB (Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg)

Die Veröffentlichung ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit des Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg. Sie wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt. Sie darf nicht für Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Unabhängig davon, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Broschüre dem Empfänger zugegangen ist, darf sie, auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl, nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Landesregierung zugunsten einzelner Gruppen verstanden werden könnte.

Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers

Potsdam, März 2022

Abkürzungsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	5
1 Einführung	6
1.1 Hintergrund	6
1.2 Rahmenbedingungen der Luftqualitätsrichtlinie	6
1.3 Ziele der Messkampagne	7
2 Messstellenbeschreibung	8
2.1 Neuendorfer Straße	11
2.2 Mühlendamm und Molkenmarkt	11
2.3 Mühlentorstraße	12
2.4 Pfaffe-Kai	12
2.5 Am Salzhof und Heinrich-Heine-Ufer	12
2.6 Lilli-Friesicke-Straße	12
3 Methodik	14
3.1 Probenahme mit Passivsammlern und anschließende Laboranalyse	14
3.2 Datenaufbereitung	15
3.3 Repräsentativitätsanalyse	16
4 Ergebnisse	18
5 Auswertung	24
5.1 Bewertung des Messcontainerstandortes	24
5.2 Vergleich zwischen Ergebnissen der Passivsammler-Messungen und Modellergebnissen	24
5.3 Vergleich zwischen Ergebnissen der Passivsammler-Messungen und Messungen mit der Referenzmethode	25
5.4 Gegenüberstellung Passivsammler-Messungen und Verkehrsbelegung	27
5.5 Weitere Schlussfolgerungen	28
Quellenverzeichnis	29

Abkürzungsverzeichnis

AG	Aktiengesellschaft
DEBBXXX	Europäische Messortbezeichnung für Luftgütemessstationen
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr in Fahrzeugen pro Stunde
EU	Europäische Union
ImSchZV	Immissionsschutzzuständigkeitsverordnung
ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
Kfz/24h	Kraftfahrzeuge pro 24 Stunden
km/h	Kilometer pro Stunde
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LfU	Landesamt für Umwelt Brandenburg
m	Meter
MP	Messpunkt der Stickstoffdioxid-Passivsammler-Messung
nm	Nanometer
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickstoffoxide
RL	Richtlinie
SVU	Stadt-Verkehr-Umwelt (Ingenieurbüro)
UBA	Umweltbundesamt
z.B.	zum Beispiel
µg/m ³	Mikrogramm pro Kubikmeter
<	kleiner als
>	größer als
%	Prozent
°	Grad
39. BImSchV	Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Karte mit NO ₂ -Passivsammler-Messstellen in Brandenburg an der Havel und den modellierten NO ₂ -Immissionen für das Jahr 2014 (modifiziert nach [6])	10
Abbildung 2:	Messpunkte in der Neuendorfer Str., Mühlentorstr., Mühlendamm und am Molkenmarkt (von links nach rechts und oben nach unten).....	11
Abbildung 3:	Messstellen Am Salzhof (MP5.0, links) und Heinrich-Heine-Ufer Anleger 1 (MP6.0, rechts)	
Abbildung 4:	Messstelle Lilli-Friesicke-Straße (MP7.0)	13
Abbildung 5:	Installation von NO ₂ -Probenröhrchen im Schutzbehälter an einer Straßenlaterne an der Messstelle Pfaffe-Kai (MP2.0)	14
Abbildung 6:	NO ₂ -Passivsammler und Glasfrittenmembran zum Schutz vor Windeinflüssen (modifiziert nach [9])	15
Abbildung 7:	NO ₂ -Jahresmittelwerte für 2019 der Passivsammler-Messungen im Stadtraum Brandenburg an der Havel im Vergleich zu den Referenzmessungen.....	19
Abbildung 8:	Box-Plots der NO ₂ -Konzentrationen des Jahres 2019 an den Passivsammlermesspunkten (MP). Erläuterungen im Text.	19
Abbildung 9:	Ausgewählte Ergebnisse der Passivsammler im Vergleich zur Referenzmessung am Luftgütemesscontainer in der Neuendorfer Straße (DEBB049).	20
Abbildung 10:	Ausgewählte Ergebnisse der Passivsammler im Vergleich zur Referenzmessung am Luftgütemesscontainerim im städtischen Hintergrund (DEBB055).	21
Abbildung 11:	Vergleich mittels Passivsammler ermittelten NO ₂ -Jahresmittelwerten 2019 und den NO ₂ -Jahresmittelwerten für 2020 aus der Immissionsprognose.	25
Abbildung 12:	Vergleich zwischen den Messergebnissen der NO ₂ -Passivsammler und den Ergebnissen, mit der Referenzmethode. Erläuterungen im Text.	26
Abbildung 13:	Gegenüberstellung NO ₂ -Jahresmittelwerte für 2019 (Passivsammler, blaue Punkte) und durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV für 2020, graue Säulen).....	27

1 Einführung

1.1 Hintergrund

Das Landesamt für Umwelt betreibt als zuständige Behörde für den Immissionsschutz in Brandenburg (§1 ImSchZV, [1]) das landesweite Luftgütemessnetz in Umsetzung der Europäischen Richtlinie (RL) über Luftqualität und saubere Luft für Europa (2008/50/EG, [2]) sowie deren Änderung in Richtlinie (EU) 2015/1480 [3]. Die dortigen Vorgaben werden mit der Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen (39. BImSchV, [4]) in deutsches Recht umgesetzt.

In der Stadt Brandenburg an der Havel werden seit vielen Jahren Luftgütemessstellen zur Überwachung der Luftqualität betrieben. Repräsentativ für die städtische Hintergrundbelastung steht die Station „Brandenburg an der Havel“ in der Lilli-Friesicke-Straße. Hinzu kommt die verkehrsbezogene Messstation „Brandenburg an der Havel, Neuendorfer Straße“, die die höchsten Immissionsbelastungen im Stadtgebiet, verursacht durch den direkten Einfluss des Straßenverkehrs, überwachen soll. An beiden Messstellen werden die Stickstoffdioxid-Grenzwerte (NO₂) der 39. BImSchV sicher eingehalten.

Zusätzlich zu diesen dauerhaften Messungen wurden im Rahmen einer Messkampagne zwischen Juli 2018 und Januar 2020 NO₂-Passivsammler-Messungen durchgeführt. Dazu wurden im Stadtgebiet, insbesondere an Orten, die eine erhöhte NO₂-Belastung vermuten ließen, zehn temporäre Messstellen installiert. Ziel dieser Messkampagne war es, insbesondere den verkehrsbezogenen Messstandort in der Neuendorfer Straße zu überprüfen und hinsichtlich der gesetzlichen Standortanforderungen zu bewerten. Der vorliegende Fachbericht stellt die Auswertungen und Ergebnisse der NO₂-Passivsammler-Messungen in Brandenburg an der Havel dar.

1.2 Rahmenbedingungen der Luftqualitätsrichtlinie

Damit Luftqualitätsdaten unterschiedlicher EU-Mitgliedsstaaten miteinander vergleichbar sind und eine faire Bewertung hinsichtlich der einheitlichen Leit-, Ziel- und Grenzwerte möglich ist, sind für die Beurteilung umfangreiche und mitunter detaillierte gesetzliche Anforderungen zu erfüllen. Auf einen kurzen Abriss der Luftqualitätsrichtlinie [2] soll an dieser Stelle daher nicht verzichtet werden.

Gemäß Artikel 4 hat jeder Mitgliedsstaat auf seinem gesamten Hoheitsgebiet Gebiete und Ballungsräume festzulegen und dort die Luftqualität zu beurteilen und unter Kontrolle zu halten. Im darauffolgenden Abschnitt 1 werden Beurteilungsverfahren, Beurteilungskriterien, Probenahmestellen sowie Referenzmethoden beschrieben. Vereinfacht gesagt ergibt sich aus dem Zuschnitt der Beurteilungsgebiete, der jeweiligen Bevölkerungsdichte sowie der bisherigen Luftschadstoffkonzentration zunächst das anzuwendende Beurteilungsverfahren: Messung, Modellrechnung oder objektive Schätzung. In der Folge bemisst sich danach auch die erforderliche Anzahl an Probenahmestellen. Dies sind in der Praxis zumeist spezielle Messcontainer, in denen Messgeräte zur Erfassung verschiedener Luftschadstoffe untergebracht sind.

Die Randbedingungen für die Lage von Stickstoffdioxid-Probenahmestellen sind in Artikel 7 in Verbindung mit Anhang III der Richtlinie geregelt.

Abschnitt B des Anhangs III befasst sich mit der großräumigen Ortsbestimmung der Probenahmestellen. Im Kontext des Gesundheitsschutzes ist demnach für die Aufstellung einer Messeinrichtung im Allgemeinen der Ort der höchsten Konzentrationen zu wählen. Dabei sollen Luftproben an verkehrsbezogene

nen Messstellen für einen Straßenabschnitt von nicht weniger als 100 Meter Länge repräsentativ sein. Messwerte städtischer Hintergrundstationen sollen dementsprechend sogar typisch für mehrere Quadratkilometer sein. Im darauffolgenden Abschnitt C wird die kleinräumige Ortsbestimmung der Probenahmestellen behandelt. Dies betrifft beispielsweise die Berücksichtigung bestimmter Geometrien für die Luftanströmung und die Probenahmehöhe. Der abschließende Abschnitt D regelt die Dokumentation für die Ortswahl und fordert deren regelmäßige Überprüfung und gegebenenfalls erneute Dokumentation, damit die fortwährende Gültigkeit der Ortswahlkriterien sichergestellt ist.

1.3 Ziele der Messkampagne

Die Messkampagne mit NO₂-Passivsammlern in Brandenburg an der Havel wurde in Umsetzung der oben genannten Anforderungen der Luftqualitätsrichtlinie [2] durchgeführt. Dabei sollten Stickstoffdioxidkonzentrationen an mehreren Punkten im verkehrsbedingt belasteten Raum messtechnisch untersucht werden. Die Anwendung von NO₂-Passivsammlern stellt hierfür eine einfache und kostengünstige, zugleich auch verlässliche und qualitätsgesicherte Methodik dar, die bereits im Potsdamer Stadtgebiet im Jahr 2016 erfolgreich umgesetzt wurde [5]. Die Ergebnisse der Passivsammler sollten zudem durch den Bezugszeitraum und das Datenqualitätsniveau mit den im Routinebetrieb ermittelten Jahresmittelkonzentrationen an den beiden Messcontainern in Brandenburg an der Havel gegenübergestellt werden können.

Die Überprüfung der Ortswahl für die verkehrsbezogene Messstelle in der Neuenendorfer Straße war auch nach den Ergebnissen im Abschlussbericht zum Luftreinhalteplan Brandenburg an der Havel Fortschreibung 2014/2015 [6] aus dem Jahr 2016 erforderlich.

Dort enthaltene Modellierungen prognostizierten grenzwertrelevante NO₂-Konzentrationen in einem Straßenabschnitt des Mühlendamms und an einer Bootsliagestelle nordöstlich der Innenstadt, außerdem wurden in der Nähe der Neustädtischen Wassertorstraße sowie an weiteren Straßenabschnitten erhöhte NO₂-Konzentrationen identifiziert. Im Abschlussbericht wird daher auch eine Überprüfung der Verlegung der Messstelle aus der Neuenendorfer Straße in den Bereich Mühlendamm/Molkenmarkt zugesagt.

Die Ergebnisse der Messkampagne in Brandenburg an der Havel sollten somit folgende grundsätzlichen Fragestellungen beantworten:

1. Entspricht die Messstelle in der Neuenendorfer Straße weiterhin den gesetzlichen Kriterien für die Ortswahl, vereinfacht: Steht der Messcontainer (noch) an der richtigen Stelle? Ist die Neuenendorfer Straße hiernach (noch) als der entscheidende Hotspot einzustufen oder müssen wir andere Bereiche stärker in den Fokus nehmen?
2. Wie sind die Modellergebnisse der NO₂-Konzentrationen im Brandenburger Stadtgebiet unter Berücksichtigung von qualitätsgesicherten Messwerten einzuordnen?
3. Wie ist die Repräsentativität der beiden Luftgütemessstationen in Brandenburg an der Havel bezogen auf Stickstoffdioxid einzuschätzen?
4. Wie ist der zusätzliche Erkenntnisgewinn durch die eingesetzten NO₂-Passivsammler in der Stadt Brandenburg an der Havel zu bewerten und welche Erfahrungen sollten bei zukünftigen Projekten berücksichtigt werden?

2 Messstellenbeschreibung

Die Grundlage für die Identifizierung von möglichen NO₂-Passivsammler-Messstellen in Brandenburg an der Havel war der Abschlussbericht zum Luftreinhalteplan Brandenburg an der Havel Fortschreibung 2014/2015 [6] aus dem Jahr 2016. Darin wurde eine Karte mit modellierten NO₂-Jahresmittelwerten veröffentlicht, die die Belastung für das gesamte Stadtgebiet für das Jahr 2014 zeigt. Die Modellierung prognostiziert für das Bezugsjahr in einem Straßenabschnitt des Mühlendamms und an einer Bootsliegestelle nordöstlich der Innenstadt, in der Nähe der Neustädtischen Wasserstorstraße, eine mögliche Überschreitung des NO₂-Grenzwertes von 40 µg/m³ für das Jahresmittel. Im übrigen Stadtgebiet wurden Konzentrationen unterhalb des Grenzwertes modelliert. Dennoch wurden auch für weitere Straßenabschnitte erhöhte Immissionen berechnet, zum Beispiel am Molkenmarkt, in der Mühlentorstraße und in einem weiteren Abschnitt des Mühlendamms.

Diese Orte der erhöhten modellierten NO₂-Belastung wurden grundsätzlich bei der Auswahl der Passivsammler-Messstellen berücksichtigt. Zugleich sollten potenzielle Messstellen den Standortkriterien für Luftqualitätsmessungen nach der EU-Richtlinie bestmöglich entsprechen. Auch müssen beim Errichten von Messstellen immer die jeweiligen Begebenheiten vor Ort beachtet werden. So werden Passivsammler in der Regel an Straßenlaternen, Verkehrsschildern oder weiteren geeigneten Punkten befestigt, wobei sich möglichst alle Installationspunkte einer Kamapgne in vergleichbarem Abstand und ähnlicher Höhe in Bezug auf die Fahrbahn befinden sollten.

Die im Frühjahr 2018 inspizierten und festgelegten Messstellen sind in Tabelle 1 aufgelistet. Neben den Punkten der höchsten modellierten Belastung wurden Passivsammler an den Luftgütemesscontainern in der Neu-

endorfer Straße (DEBB049, MP0.1, MP0.2) und in der Lilli-Friesicke-Straße (DEBB055, MP7.0) errichtet. Hier sollte die Vergleichbarkeit mit den automatischen NO₂-Messungen der stationären Messstationen überprüft werden. Weitere Messstellen befinden sich an innerstädtischen Bootsanlegestellen (MP5.0 und MP6.0). Diese wurden ausgewählt, um einen möglichen Einfluss des Schifffverkehrs auf die NO₂-Belastung quantifizieren zu können. Zudem kann hier eine hohe Anzahl potenziell Betroffener vermutet werden, da die Havelufer beliebte Aufenthaltsorte sind.

Die Karte (Abbildung 1) stellt die Passivsammler-Messstellen der Messkampagne zusammen mit den für die Fortschreibung des Luftreinhalteplans für Brandenburg an der Havel modellierten NO₂-Immissionen für das Jahr 2014 dar.

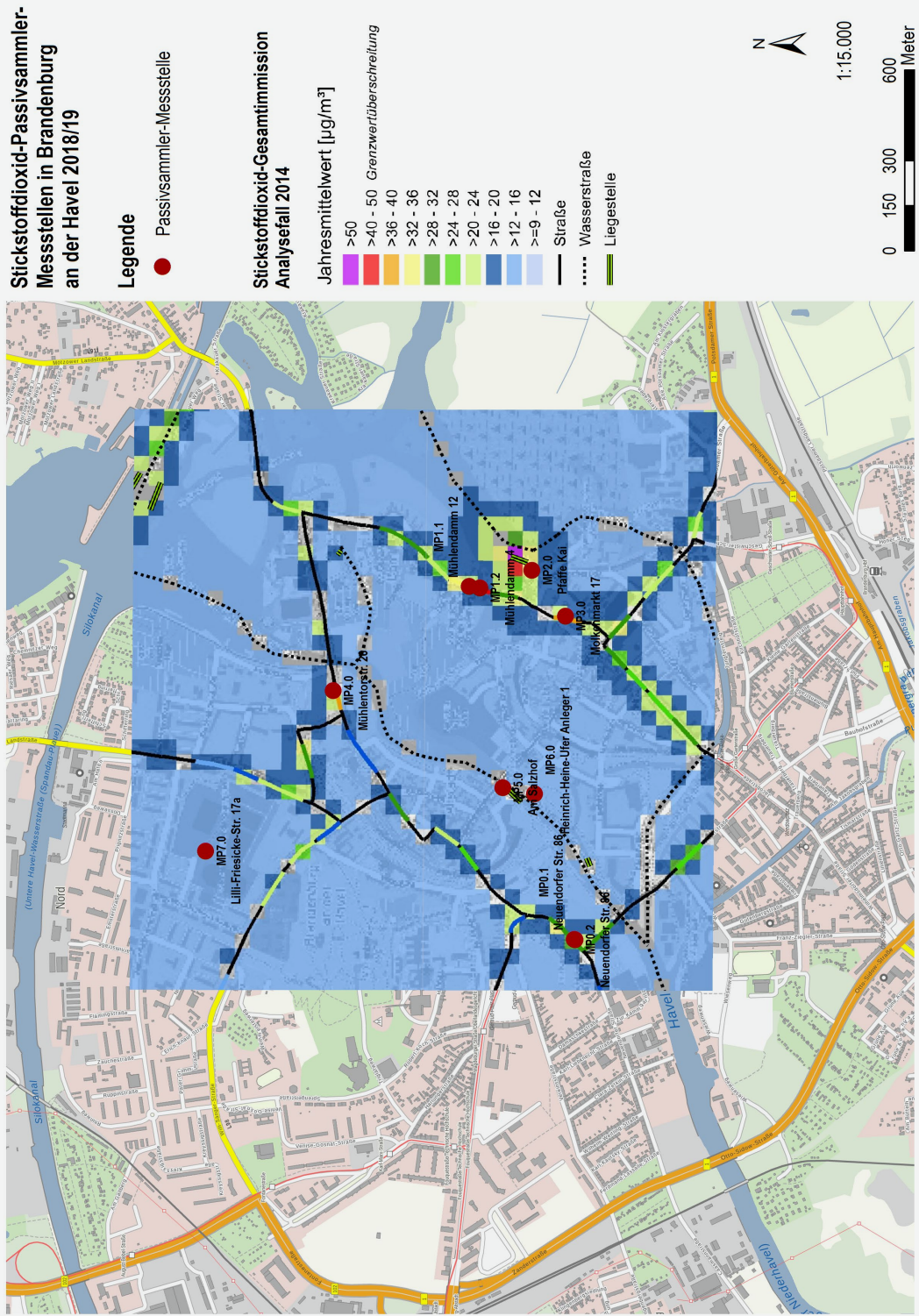
Die Probenahmeorte entsprechen weitgehend den an ortsfeste Messungen gestellten Anforderungen der Luftqualitätsrichtlinie (z.B. Abstände von der Straße, Kreuzungen, Hauswänden sowie Messhöhe).

Die Beprobung begann an allen Messstellen am 4. Juli 2018 und endete am 17. Dezember 2019. An den Messpunkten MP0.1P und MP0.2P am Messcontainer in der Neendorfer Straße wurden zusätzliche Passivsammler im 14-tägigen Versatz aufgehängt. Diese sogenannte Parallelmessung lief dementsprechend vom 17. Juli 2018 bis 7. Januar 2020. Der Probenwechsel fand auch hierbei im 28-tägigen Rhythmus statt. An der Messstelle MP6.0 am Heinrich-Heine-Ufer wurde die Messung bereits am 24. September 2019 eingestellt, weil durch Vandalismus und Diebstahl bereits mehrere Proben ausgefallen waren und somit die für ortsfeste Messungen in der Luftqualitätsrichtlinie geforderte Mindestdatenerfassung von 90 Prozent innerhalb eines Jahres nicht mehr zu erreichen war.

Tab. 1		NO ₂ -Passivsammler-Messstellen in Brandenburg an der Havel						
Name	Lage	Installation	Messhöhe über Grund (m)	Abstand zum Fahrbahnrand (m) (bei Straßenbezug)	Beprobungszeitraum	Geografische Länge	Geografische Breite	Anmerkungen
MP0.1 (MP0.1P)	Neuendorfer Str. 86 (DEBB049)	Luftgütemesscontainer, Gasprobenahme	3,0	1,5	04.07.2018 – 07.01.2020	12,548583° Ost	52,409377° Nord	inklusive Parallelmessung im Zweiwochen-Versatz
MP0.2 (MP0.2P)	Neuendorfer Str. 86	Verkehrsschild	2,6	1,0	04.07.2018 – 07.01.2020	12,548544° Ost	52,409358° Nord	inklusive Parallelmessung im Zweiwochen-Versatz
MP1.1	Mühlendamm 12	Verkehrsschild	2,3	1,65	04.07.2018 – 17.12.2019	12,565612° Ost	52,412870° Nord	
MP1.2	Mühlendamm 4	Straßenlaterne	2,5	0,5	04.07.2018 – 17.12.2019	12,565561° Ost	52,412554° Nord	
MP2.0	Pfaffe-Kai	Straßenlaterne	2,27	> 10	04.07.2018 – 17.12.2019	12,566519° Ost	52,411014° Nord	
MP3.0	Molkenmarkt 17	Straßenlaterne	2,5	1,0	04.07.2018 – 17.12.2019	12,564336° Ost	52,409973° Nord	
MP4.0	Mühlentorstr. 26	Verkehrsschild	2,27	0,8	04.07.2018 – 17.12.2019	12,560319° Ost	52,416833° Nord	
MP5.0	Am Salzhof	Schiffahrtszeichen am Ufer	2,6		04.07.2018 – 17.12.2019	12,555867° Ost	52,411670° Nord	
MP6.0	Heinrich-Heine-Ufer Anleger 1	Schild am Anleger	2,25		04.07.2018 – 24.09.2019	12,555609° Ost	52,410710° Nord	vorzeitige Einstellung der Messung
MP7.0	Lilli-Friesicke-Str. 17a (DEBB055)	Luftgütemesscontainer, Gasprobenahme	3,25		04.07.2018 – 17.12.2019	12,552276° Ost	52,420473° Nord	

Karte mit NO₂-Passivsammler-Messstellen in Brandenburg an der Havel und den modellierten NO₂-Immissionen für das Jahr 2014 (modifiziert nach [6])

Abb. 1



2.1 Neuendorfer Straße

In der Neuendorfer Straße befindet sich nordöstlich zur Einmündung der Luckenberger Straße die stationäre verkehrsbezogene Luftgütemessstation Brandenburg, Neuendorfer Straße (DEBB049). Hier wurden zwei NO₂-Passivsammler-Messpunkte installiert – die Messstelle MP0.1 unmittelbar am Probeneinlass der Gasprobenahme auf dem Messcontainerdach und die Messstelle MP0.2 an einer Straßenlaterne direkt vor dem Container (Abbildung 2 oben links).

Die Neuendorfer Straße erstreckt sich vom südwestlichen Stadtring in nordöstlicher Richtung im Stadtteil Altstadt bis in die Brandenburger Innenstadt. Am Standort des Luft-

gütemesscontainers besitzt die Straße je eine Richtungsspur und ist beidseitig von geschlossener Bebauung geprägt. Zudem führt hier eine Straßenbahnlinie entlang.

Der Grenzwert von 40 µg/m³ NO₂ im Jahresmittel wurde an der Luftgütemessstation Brandenburg, Neuendorfer Straße zuletzt im Jahr 2010 überschritten. Auch in der letzten Screening-Modellierung zum Luftreinhalteplan gehört die Neuendorfer Straße weiterhin zu den höher belasteten Bereichen.

2.2 Mühlendamm und Molkenmarkt

Der Mühlendamm erstreckt sich in Nord-Süd-Richtung und verbindet die Stadtteile Neustadt und Dom miteinander. In der Fort-

Abb. 2

Messpunkte in der Neuendorfer Str., Mühlentorstr., Mühlendamm und am Molkenmarkt (von links nach rechts und oben nach unten)



schreibung des Luftreinhalteplans wurde für einen der Straßenabschnitte mit beidseitig geschlossener Randbebauung eine NO₂-Belastung von 41 µg/m³ als Jahresmittelwert für das Jahr 2014 modelliert. Hier wurden je eine Messstelle auf der westlichen (MP1.1, Abbildung 2 unten links) und auf der östlichen Straßenseite (MP1.2, Abbildung 2 unten Mitte) installiert.

In südlicher Fortführung des Mühlendamms befindet sich die Neustädter Fischerstraße und der Molkenmarkt im Stadtteil Neustadt. Für einen Teilabschnitt des Molkenmarkts wurden für 2014 erhöhte Belastungen modelliert. Die Straße ist hier auf der östlichen Seite geschlossen bebaut. In diesem Abschnitt wurde die Messstelle MP3.0 errichtet (Abbildung 2 unten rechts).

2.3 Mühlentorstraße

Eine weitere Messstelle wurde aufgrund der erhöhten Belastungen in den Modellierungen in einem Straßenabschnitt der Mühlentorstraße errichtet (Abbildung 2 oben rechts). Die Mühlentorstraße verläuft in nordöstlicher Richtung und bildet damit die Fortführung der Neuendorfer Straße im Norden des Stadtteils Altstadt. Die Messstelle MP4.0 liegt kurz vor einer Abbiegung der Hauptstraße. Der Straßenabschnitt ist hier auf der Nordseite über eine Länge von etwa 60 m geschlossen bebaut und mit Tempo 30 km/h belegt. Südlich der Mühlentorstraße schließt sich ein kleiner Offenbereich hin zur Straße Altstädtischer Kiez an.

2.4 Pfaffe-Kai

Im Nordosten des Brandenburger Stadtteils Neustadt wurde am Havelufer in der Nähe des Bootsstegs die Messstelle Pfaffe-Kai (MP2.0, Abbildung 5 rechts) eingerichtet. Im Abschlussbericht zum Luftreinhalteplan

Brandenburg an der Havel Fortschreibung 2014/2015 wurden hier in der Umgebung der Anlegestelle die höchsten NO₂-Belastungen des gesamten Stadtgebiets für den Analysefall 2014 berechnet. Die modellierten Immissionen von über 50 µg/m³ sollten überprüft werden.

2.5 Am Salzhof und Heinrich-Heine-Ufer

Die Messstellen Am Salzhof (MP5.0) und Heinrich-Heine-Ufer Anleger 1 (MP6.0) liegen in der Nähe des Ufers der Brandenburger Niederhavel südlich der Jahrtausendbrücke. MP5.0 befindet sich am nördlichen Ufer im Stadtteil Altstadt und MP6.0 am südlichen Ufer an einer Schiffsanlegestelle im Stadtteil Neustadt. Beide Orte (Abbildung 3) sind beliebte Aufenthalts- und Ausflugsorte in Brandenburg an der Havel. In unmittelbarer Nähe zur Messstelle MP6.0 befindet sich zudem ein Spielplatz – weshalb hier zahlreiche potenziell Betroffene vermutet werden dürfen. Diese Messstellen sollten auch dazu dienen, den Einfluss des Schiffsverkehrs zu quantifizieren.

2.6 Lilli-Friesicke-Straße

Hinter dem östlichen Ende der Lilli-Friesicke-Straße – einer Nebenstraße im Stadtteil Nord – befindet sich der Standort der stationären Luftgütemessstelle Brandenburg an der Havel mit der Kennung DEBB049. Diese Messstelle ist als städtischer Hintergrund klassifiziert. Sie ist weitgehend von Rasenplätzen des angrenzenden Sportparks umgeben. Im Norden schließen sich ein Spielplatz und eine lockere Zeilenbebauung an. Der NO₂-Passivsammler-Messpunkt MP7.0 wurde hier unmittelbar neben dem Proben-einlass für die automatische Messungen auf dem Containerdach installiert (Abbildung 4). Ziel dieser Vergleichsmessung am Contai-

Abb. 3

Messstellen Am Salzhof (MP5.0, links) und Heinrich-Heine-Ufer Anleger 1 (MP6.0, rechts)

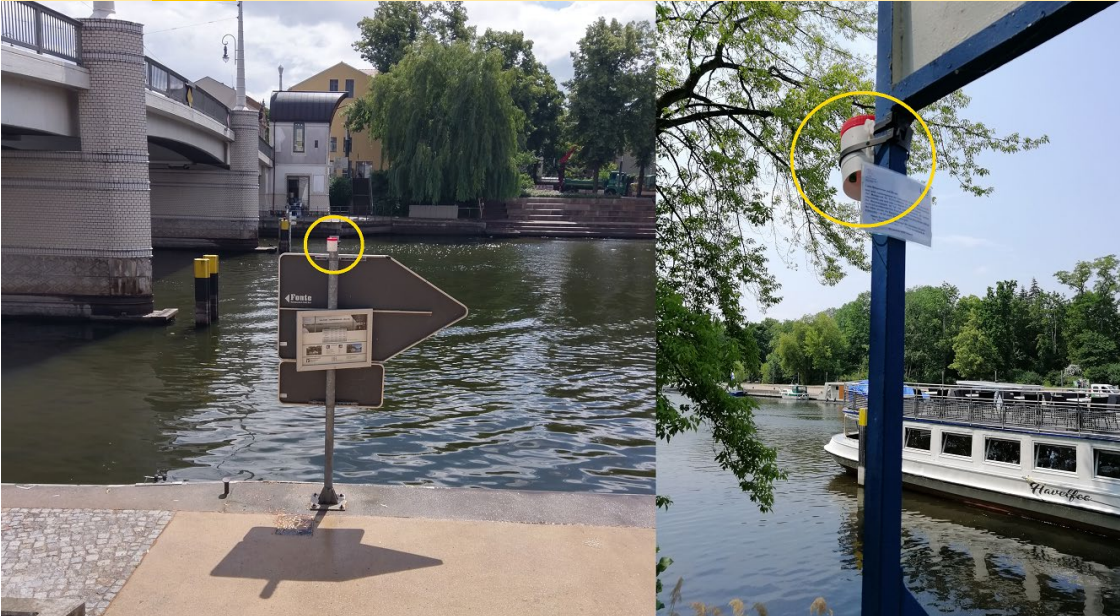


Abb. 4

Messstelle Lilli-Friesicke-Straße (MP7.0)



nerstandort ist die Verfahrenvalidierung der Passivsammler auch im niedrigeren Konzentrationsniveau des städtischen Hintergrunds im Land Brandenburg.

3 Methodik

3.1 Probenahme mit Passivsammlern und anschließende Laboranalyse

Eine gegenüber dem Aufbau von Messcontainern kostengünstige Variante ist der Einsatz sogenannter Passivsammler. Die Wahl fiel dabei auf das Schweizer Labor für Umweltanalytik Passam AG, deren Sammlerröhrchen in der Vergangenheit bereits erfolgreich im Luftgütemessnetz Brandenburg und in anderen Ländermessnetzen eingesetzt wurden. Passam AG ist nach ISO 17075 akkreditiert. Das heißt: Eine kompetente Arbeitsweise und die Erzeugung valider Ergebnisse wird von einer offiziellen Akkreditierungsstelle bestätigt [7]. Darüber hinaus konnte auch das nordrhein-westfälische Landesamt für Umwelt, Natur und Verbraucherschutz (LANUV), welches wie das Umweltbundesamt (UBA) als Deutsches Nationales Referenzlabor für die Beurteilung der Luftqualität benannt ist, die Gleichwertigkeit der Analysewerte mit

dem Referenzverfahren belegen [8]. Dieser Nachweis umfasst auch die Einhaltung der Datenqualitätskriterien nach Anhang 1 der Luftqualitätsrichtlinie.

Die Probenahme mit Passivsammlern beruht auf der Diffusion von Molekülen in ein adsorbierendes Medium, das heißt eine aktive Probenansaugung ist nicht erforderlich. Bei den verwendeten NO_2 -Passivsammlern wird als Adsorbens Triethanolium verwendet. Die nach unten geöffneten Kunststoffröhrchen werden für eine definierte Zeit (hier: etwa 28 Tage) der Umgebungskonzentration exponiert. Die Menge des dabei adsorbierten Stickstoffdioxids ist direkt proportional zur mittleren Konzentration am Probenahmeort über ebendiesen Zeitraum. Im Labor wird aus jedem Röhrchen die Gesamtmenge an aufgenommenem NO_2 extrahiert (Saltzmann-Reaktion) und die entsprechende Konzentration kolorimetrisch bei 540 nm bestimmt [9].

Abb. 5

Installation von NO_2 -Probenröhrchen im Schutzbehälter an einer Straßenlaterne an der Messstelle Pfaffe-Kai (MP2.0)



Abb. 6

NO₂-Passivsammler und Glasfrittenmembran zum Schutz vor Windeinflüssen (modifiziert nach [9])



Zum Schutz vor Witterungseinflüssen wurden die als Doppelproben ausgebrachten Sammler in einer speziellen Aufhängung untergebracht und zur Vermeidung von Vandalismus oberhalb des direkten Zugriffsbereichs von Fußgängern installiert (Abbildung 5). Der Proben-Schutzbehälter ähnelt einer unten geöffneten Dose mit Schraubdeckel. Dieser Deckel ist jedoch so konstruiert, dass er nicht dicht abschließt, sondern eine Durchströmung des Zylinders mit den darin befindlichen Proben stattfindet.

Die Sammler selbst wurden mit einer zusätzlichen Glasfrittenmembran ausgestattet (Abbildung 6), die nach Erfahrungen des LANUV effektiv den Windeinfluss, insbesondere bei starken Turbulenzen in Straßenschluchten minimieren. Die Membranen wurden bei jedem Probentausch gewechselt, um sie vor der nächsten Verwendung zu reinigen.

3.2 Datenaufbereitung

Als Ergebnis lagen aus den Laboranalysen für alle Probenahmezeiträume die ermittelten

NO₂-Konzentrationen zu jedem Einzelröhrchen vor. Da zu jedem Probenahmezeitraum eine Doppelbeprobung stattfand, wurden zunächst die zwei Einzelproben aus der Passivsammlung zu einem Wert gemittelt.

Für den Vergleich mit der kontinuierlichen Messung wurde jedem Halbstundenwert (Ergebnis der Messautomaten) im Projektzeitraum der ermittelte Konzentrationswert des korrespondierenden Passivröhrchens zugeordnet. Im Ergebnis können die mit den Messcontainern routinemäßig erfassten und die passiv bestimmten Konzentrationen gleichartig ausgewertet werden. Mittelwerte und Datenverfügbarkeiten für beliebige Zeiträume – zum Beispiel Monate, Jahre oder gleitende Jahre – sind so auch bei den Passivsammlern flexibel zu berechnen.

Im Gegensatz zur Auswertung der NO₂-Passivsammler-Messungen in Potsdam im Jahr 2016 [5] wurde bei den Passivsammler-Ergebnissen in Brandenburg an der Havel auf eine zusätzliche Kalibrierung auf das Referenzverfahren verzichtet. Analysen des nord-

rhein-westfälischen Landesamts für Umwelt, Natur und Verbraucherschutz (LANUV) haben gezeigt, dass Passiv- und Passivsammler und Ergebnisse mit Referenzverfahren gleichwertig sind und diese Ergebnisse die Qualitätsanforderungen für ortsfeste Messungen entsprechend der EU Luftqualitätsrichtlinie erfüllen [8].

3.3 Repräsentativitätsanalyse

Zur Überprüfung der räumlichen Repräsentativität der Passivsammlermessstellen wurde im Luftgütemessnetz Brandenburg erstmals eine statistische Methode verwendet. Diese unterstellt, dass Messpunkte räumlich repräsentativ sind, solange Datenkollektive benachbarter Vergleichsmessstellen für denselben Zeitraum statistisch nicht unterscheidbar sind.

Vorgelegt wurde die Methode auf dem Messtechnischen Kolloquium 2018 von Frank Bunzel, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz. In Rheinland-Pfalz wurde damit die räumliche Repräsentativität von verkehrsbezogenen NO₂-Messstellen in Mainz und in Ludwigshafen nachgewiesen, wobei ebenso NO₂-Passivsammler-Daten verwendet wurden, die über einen Zeitraum von einem Jahr erhoben wurden¹.

Als Datengrundlage für die Repräsentativitätsanalyse dienten zunächst die real kalendarischen Monatsmittelwerte der Passivsammlermessung, die auf Basis der Halbstundenmittelwerte ermittelt wurden. Es wurden ausschließlich Monatsmittelwerte verwendet, deren Verfügbarkeit mindestens 90 Prozent beträgt. Im Weiteren wurde die Repräsentativitätsanalyse auch mit den originalen Ergebnissen der Sammler (das heißt: asynchron zum Kalendermonat) durchgeführt.

¹ Unveröffentlicht, mit freundlicher Genehmigung des Autors

Um nachzuweisen, dass zwischen zwei zeitgleich erhobenen Datenkollektiven kein statistischer Unterschied besteht, wurde ein t-Test durchgeführt. Der t-Test erfordert einen vorgelagerten, erfolgreichen F-Test. Im Folgenden werden die Grundlagen beider Tests erläutert. Die Ergebnisse der Repräsentativitätsanalyse sind in Kapitel 4 dargestellt.

F-Test

Beim F-Test wird überprüft, ob sich zwei Datenkollektive bestehend aus den Messwerten x_1 bis x_n und y_1 bis y_n hinsichtlich ihrer Varianz signifikant unterscheiden. Dazu müssen mit Gleichung 1 und Gleichung 2 die Varianzen s_x und s_y der beiden Datenkollektive ermittelt werden.

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n_x - 1}} \quad (1)$$

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{n_y - 1}} \quad (2)$$

Anschließend wird die Prüfgröße F bestimmt. Dazu werden die Varianzen in Gleichung 3 in Relation gesetzt, wobei das Datenkollektiv mit der größeren Varianz im Zähler stehen muss.

$$F = \frac{s_x^2}{s_y^2} \quad (\text{für } s_x > s_y) \quad (3)$$

Aus der F-Tabelle (Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$) – einer Tabelle, die die Quantile der Fisher-Verteilung für verschiedene Kombinationen von Freiheitsgraden enthält – kann der kritische F-Wert F^* entnommen werden. Die Freiheitsgrade v_x und v_y ergeben sich aus der Anzahl der Messwerte pro Datenkollektiv mit Gleichung 4 und Gleichung 5.

$$v_x = n_x - 1 \quad (4)$$

$$v_y = n_y - 1 \quad (5)$$

Wenn die Prüfgröße F kleiner als der kritische F-Wert F^* ist, unterscheiden sich die Varianzen der beiden Datenkollektive nicht signifikant und der t-Test kann durchgeführt werden.

t-Test

Der t-Test dient der Überprüfung, ob sich die Mittelwerte zweier Datenkollektive bestehend aus den Messwerten x_1 bis x_n und y_1 bis y_n signifikant unterscheiden. Dazu werden mit Gleichung 6 die Prüfgröße τ und mit Gleichung 7 die Anzahl der Freiheitsgrade v ermittelt.

$$\tau = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{\sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2 + \sum(y_i - \bar{y})^2}{n_x + n_y - 2}}} \cdot \sqrt{\frac{n_x \cdot n_y}{n_x + n_y}} \quad (6)$$

$$v = n_x + n_y - 2 \quad (7)$$

Für die Anzahl der Freiheitsgrade v und unter der Annahme eines Signifikanzniveaus von $\alpha = 0,05$ kann aus der t-Tabelle – einer Tabelle, die die Quantile der Student-Verteilung auflistet – der kritische t-Wert $\tau_{,95}$ entnommen werden. Ist die Prüfgröße τ kleiner als der kritische t-Wert $\tau_{,95}$, unterscheiden sich die Mittelwerte der beiden Datenkollektive nicht signifikant. Liegt die Prüfgröße τ zwischen dem kritischen t-Wert $\tau_{,95}$ und dem kritischen t-Wert $\tau_{,99}$ (Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$), dann unterscheiden sich die Mittelwerte wahrscheinlich. Ist die Prüfgröße τ größer als der kritische t-Wert $\tau_{,99}$, so unterscheiden sich die Mittelwerte signifikant.

4 Ergebnisse

Insgesamt waren für die NO₂-Passivsammler-Messungen in Brandenburg an der Havel an zwölf Messstellen die Untersuchungen von 456 Passivsammler-Röhrchen vorgesehen. Für 434 dieser Röhrchen lagen abschließend Analyseergebnisse vor, sodass insgesamt 217 aus zwei Röhrchen gemittelte Vierwochenmittelwerte für die Auswertung zur Verfügung standen. Die Untersuchungsausfälle der 22 Röhrchen wurden durch wiederholten Diebstahl beziehungsweise Beschädigung der Passivsammler an der Messstelle und die darin begründete vorzeitige Einstellung der Messung am Heinrich-Heine-Ufer (MP6.0) sowie durch fehlerhafte Dokumentation verursacht.

Bei der Betrachtung der NO₂-Jahresmittelwerte für 2019 (Abbildung 7) fällt auf, dass die Ergebnisse in zwei Belastungsniveaus eingeteilt werden können. Zu den Messstellen mit einer höheren Belastung zählen die Messstellen in der Neuendorfer Straße (MP0.1, MP0.1P, MP0.2 und MP0.2P), auf dem Mühlendamm (MP1.1 und MP1.2), am Molkenmarkt (MP3.0) und in der Mühlentorstraße (MP4.0). An diesen Passivsammler-Messstellen wurden Jahresmittelwerte zwischen 19,1 und 23,5 µg/m³ berechnet.

Im Vergleich dazu liegt der Jahresmittelwert, der mit dem Referenzverfahren am Luftgütemesscontainer in der Neuendorfer Straße ermittelt wurde, bei 23,5 µg/m³. Diese sechs Messstellen weisen ähnliche, wenn auch zum Teil leicht geringere NO₂-Konzentrationen gegenüber der Messung des Containers. Entsprechend ihrer kleinräumigen Lage sind sie erwartungsgemäß auch im Konzentrationsniveau als verkehrsbezogene Messstellen einzustufen.

Die höchsten Konzentrationen liegen an den beiden Messstellen in der Neuendorfer Straße (MP0.1 und MP0.2) mit 21,9 beziehungs-

weise 23,4 µg/m³ vor. Die jeweiligen Parallelmessungen (MP0.1P und MP0.2P), bei denen die Probenahme zeitversetzt erfolgte, weisen mit 21,6 beziehungsweise 23,5 µg/m³ nahezu identische Jahresmittelwerte auf. Der Unterschied von 1,5 µg/m³ zwischen MP0.1 und MP0.2 lässt sich wahrscheinlich durch die verschiedenen Mikrostandorte erklären: Die Passivsammler bei MP0.2 wurden an einer Straßenlaterne in einer Höhe von 2,60 m und einem Abstand vom Fahrbahnrand von 1,00 m angebracht, während die Passivsammler bei MP0.1 auf dem Messcontainer in 3,00 m Höhe und 1,50 m vom Fahrbahnrand entfernt installiert wurden. Dieser Entfernung Unterschied zur Emissionsquelle Straßenverkehr kann die höhere Belastung an der Messstelle MP0.2 erklären.

Für die vier weiteren verkehrsbezogenen Passivsammler-Messstellen am Molkenmarkt (MP3.0), in der Mühlentorstraße (MP4.0) und auf dem Mühlendamm (MP1.1 und MP1.2) wurden für das Jahr 2019 Jahresmittelwerte zwischen 19,1 und 20,1 µg/m³ ermittelt. Dies spiegelt eine geringere Belastung als an den Messstellen in der Neuendorfer Straße wider.

Insgesamt niedrigere NO₂-Belastungen wurden mit Jahresmittelwerten zwischen 9,4 und 12,6 µg/m³ am Luftgütemesscontainer in der Lilli-Friesicke-Straße (MP7.0) und an den Messstellen am Havelufer Pfaffe-Kai (MP2.0), Am Salzhof (MP5.0) und Heinrich-Heine-Ufer (MP6.0) festgestellt. Am Container wurde mit dem Referenzverfahren eine NO₂-Jahresmittelkonzentration von 12,1 µg/m³ ermittelt. Die Ergebnisse dieser vier Passivsammler-Messstellen liegen somit auf dem Niveau der städtischen Hintergrundmessstelle. Hier muss jedoch angemerkt werden, dass an den Messstellen MP5.0 und MP6.0 die Datenverfügbarkeit für das Jahr 2019 deutlich unter 90 Prozent lag. Dieser Umfang wäre bei einer „echten“ Beurteilungs-

Abb. 7

NO₂-Jahresmittelwerte für 2019 der Passivsammler-Messungen im Stadtraum Brandenburg an der Havel im Vergleich zu den Referenzmessungen

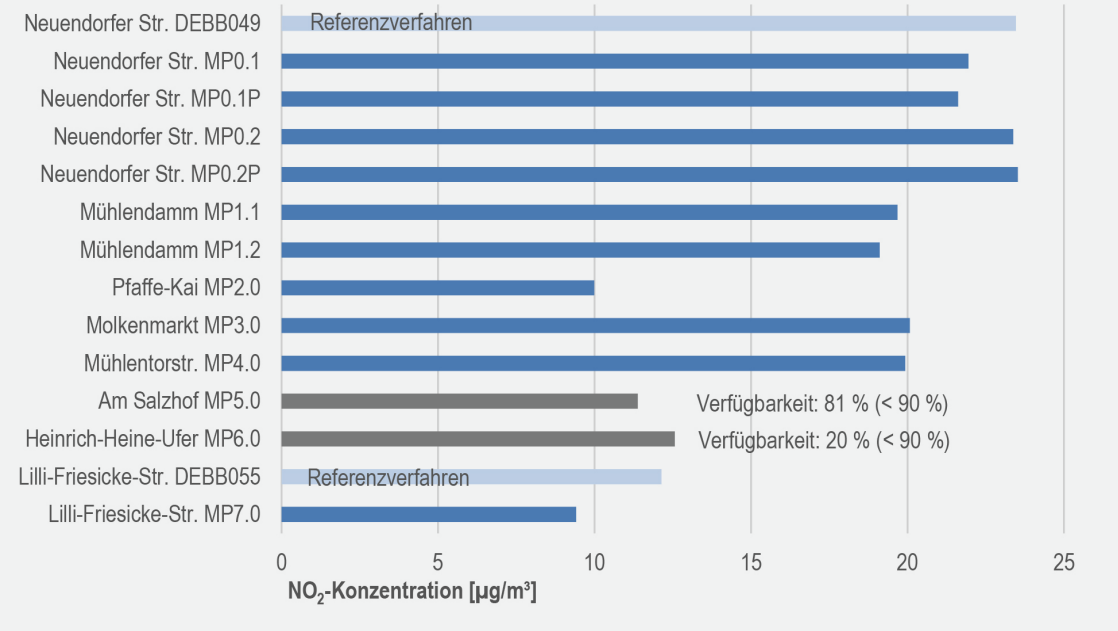
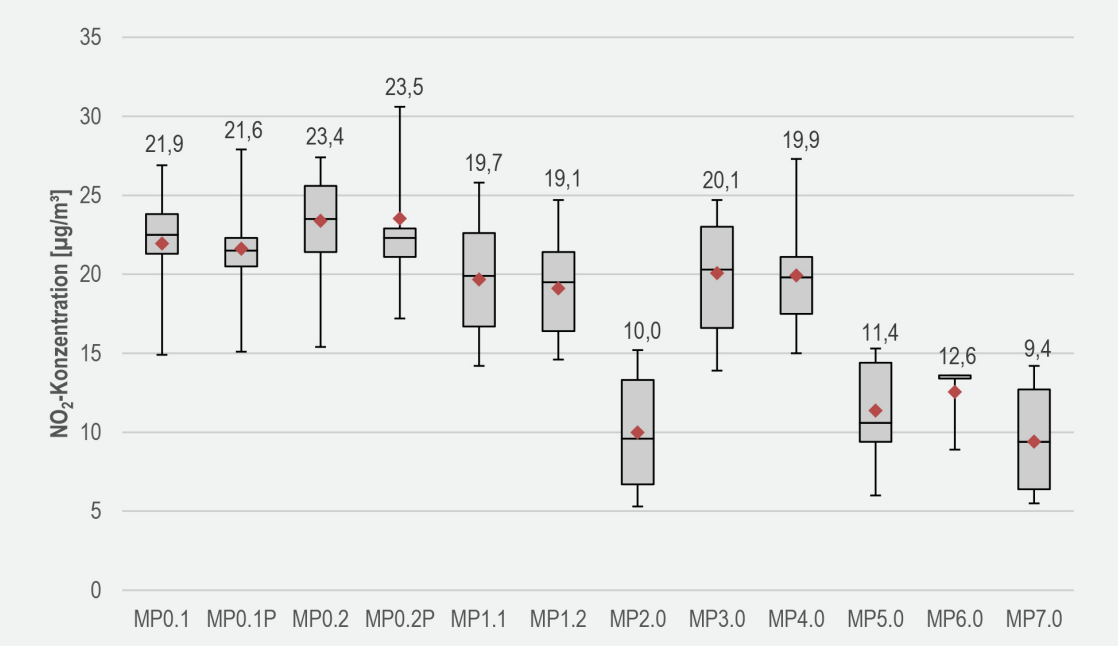


Abb. 8

Box-Plots der NO₂-Konzentrationen des Jahres 2019 an den Passivsammlermesspunkten (MP). Erläuterungen im Text.

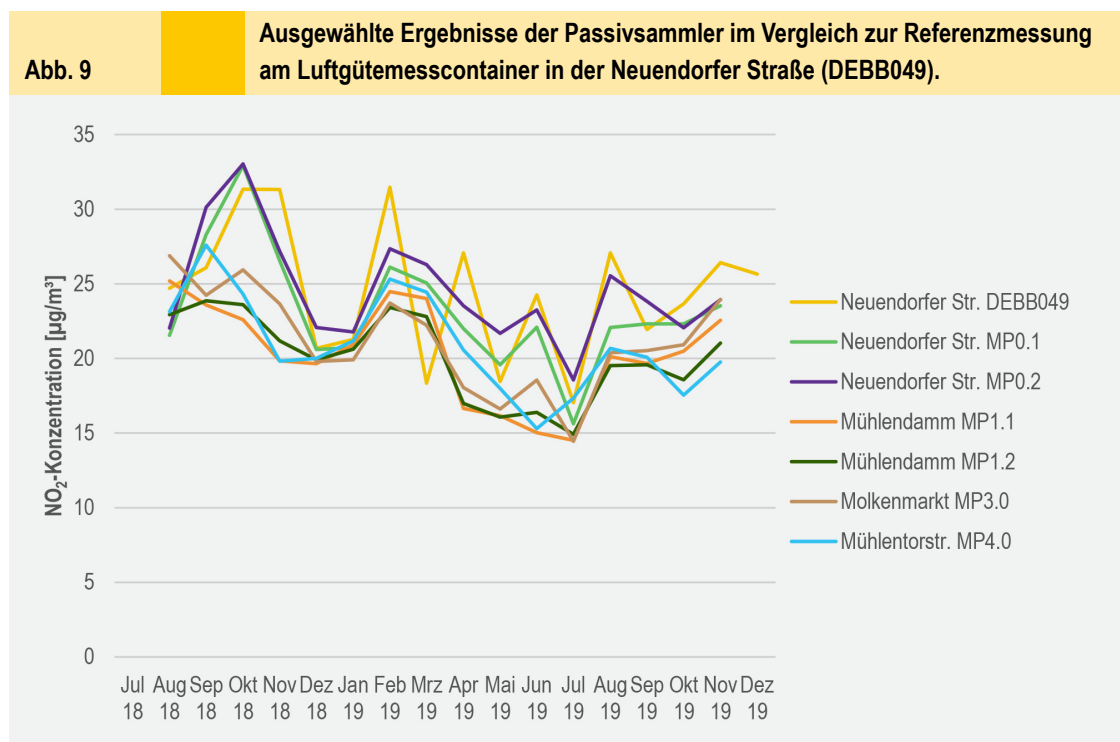


messung nach Luftqualitätsrichtlinie verbindlich zu erheben. Auch bei den folgenden Auswertungen der Sondermesskampagne berücksichtigen wir daher die eingeschränkte Aussagekraft der genannten lückenhaften Ergebnisreihen.

In Abbildung 8 sind die NO_2 -Konzentrationen der Einzelergebnisse im Jahr 2019 als Box-Plots dargestellt. Die Box stellt den Interquartilsabstand und Median dar, die Whisker kennzeichnen Minimum und Maximum. Zusätzlich ist der jeweilige Mittelwert (roter Punkt und angegebener Wert über der Box) dargestellt. Auch aus dieser Darstellungsweise geht hervor, dass die höchsten Belastungen an den Messpunkten in der Neuendorfer Straße (MP0.1, MP0.1P, MP0.2 und MP0.2P) gemessen wurden. Die Spannweite über das Jahr – der Abstand zwischen Minimum und Maximum – ist bei allen Messstellen ähnlich und liegt etwa zwischen 9 und 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Auffällig ist, dass der Interquartilsabstand – die Länge der Box – bei den Messstellen in der

Neuendorfer Straße kleiner ist als an den anderen Messstellen. Möglicherweise führt hier die enge Straßenschlucht in Kombination mit einer im Monatsvergleich mehr oder weniger konstanten Verkehrsbelegung zu einer geringeren Streuung der Messwerte.

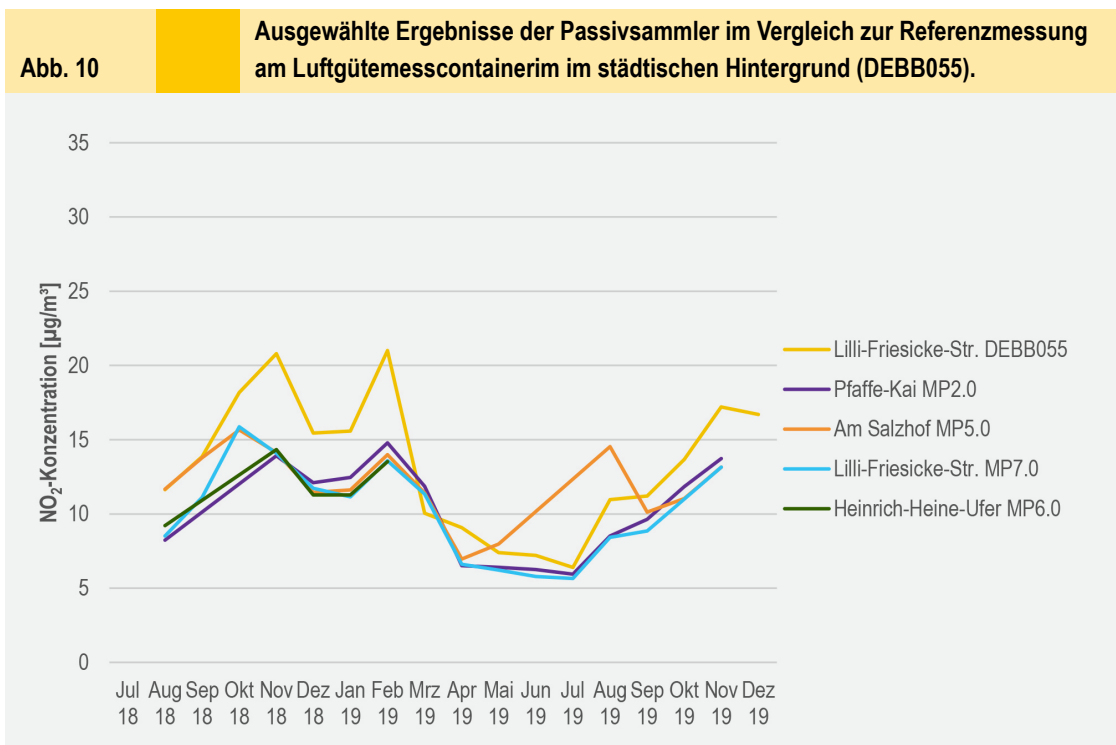
Abbildung 9 stellt die berechneten kalendrischen Monatsmittelwerte zwischen Juli 2018 und Dezember 2019 mit Verfügbarkeiten von über 90 Prozent für die verkehrsbezogenen Passivsammler-Messstellen dar. Der Vergleich zur stationären Messstation in der Neuendorfer Straße (DEBB049) zeigt einen ähnlichen Verlauf dieser Mittelwerte. Auch die Mittelwertverläufe der Passivsammler-Messstellen liegen nah beisammen. Wie auch bei der Betrachtung der Jahresmittelwerte wird deutlich, dass die absolut höchsten Monatsmittelwerte in der Neuendorfer Straße (MP0.1 und MP0.2) gemessen wurden. An den anderen verkehrsbezogenen Passivsammler-Messstellen sind die Konzentrationen fast immer um einige $\mu\text{g}/\text{m}^3$ niedriger.



Die ermittelten kalendarischen Monatsmittelwerte zwischen Juli 2018 und Dezember 2019 des niedrigeren Belastungsniveaus werden in Abbildung 10 präsentiert. Auch hier bilden die Ergebnisse der Passivsammler die Verlaufskurve am stationären Messort in der Lilli-Friesicke-Straße (DEBB055) weitgehend ab. Die Monatsmittelwerte der Messstellen Pfaffe-Kai (MP2.0) und Lilli-Friesicke-Straße (MP7.0) sind nahezu identisch. Dies trifft auch auf die wenigen vorhandenen Werte des Heinrich-Heine-Ufers (MP6.0) zu, wo nur bis Februar 2019 Monatsmittelwerte vorliegen. An der Messstelle Am Salzhof (MP5.0) wurden in den Sommermonaten von Mai bis September im Vergleich zu den anderen Messstellen höhere Werte ermittelt. Als Erklärung kommen verschiedene Ursachen in Betracht. Einerseits könnten die Emissionen des saisonal stärkeren Schiffsverkehrs Zusatzbelastungen verursachen. Am Salzhofufer befinden sich mehrere Anlegestellen, von denen Touren der Reedereien starten.

Andererseits wird das Ufer gern zum Verweilen bei schönem Wetter genutzt. Unsere Messtechniker konnten vom Rauch der einen oder anderen Zigarette am Messpunkt berichten. Dieser enthält unter anderem Stickoxide, die von den Passivsammlern erfasst werden und zu vergleichsweise hohen Messergebnissen führen können.

Die im Kapitel 3.3 beschriebene Repräsentativitätsanalyse mithilfe der statistischen Tests wurde für die Datenkollektive aller Monatsmittelwerte der NO₂-Passivsammler von Juli 2018 bis Dezember 2019 durchgeführt, die zugleich eine Verfügbarkeit von über 90 Prozent aufwiesen. Die Ergebnisse der F- und t-Tests sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich dabei jeweils auf die Bezugsmessstelle MP0.1 in der Neuenendorfer Straße (erste Tabellenzeile).



Tab. 2 Ergebnisse der Repräsentativitätsanalyse der NO₂-Passivsammler-Messstellen in Brandenburg an der Havel. Erläuterungen im Text.

Name	Lage	F-Test					t-Test					
		Mittelwert \bar{x}	Varianz s	Prüfgröße F	kritischer F-Wert F^*	kein signifikanter Unterschied zwischen den Varianzen	Prüfgröße τ	kritischer t-Wert ($\alpha = 0,05$) τ_{95}	kritischer t-Wert ($\alpha = 0,01$) τ_{99}	kein signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten	wahrscheinlicher Unterschied zwischen den Mittelwerten	
MP0.1	Neuendorfer Str. 86	23,2	15,7	1,000	2,330	Ja	0,000	2,042	2,750	ja	nein	
MP0.2	Neuendorfer Str. 86	24,5	13,1	1,201	2,330	Ja	0,973	2,042	2,750	ja	nein	
MP1.1	Mühlendamm 12	20,3	11,3	1,388	2,330	Ja	2,207	2,042	2,750	nein	ja	
MP1.2	Mühlendamm 4	20,1	8,3	1,889	2,330	Ja	2,549	2,042	2,750	nein	ja	
MP3.0	Molkenmarkt 17	21,2	11,5	1,359	2,330	Ja	1,513	2,042	2,750	ja	nein	
MP4.0	Mühlentorstr. 26	20,9	10,8	1,458	2,330	Ja	1,765	2,042	2,750	ja	nein	
MP0.1P	Neuendorfer Str. 86	22,8	11,7	1,346	2,290	Ja	0,283	2,040	2,744	ja	nein	
MP0.2P	Neuendorfer Str. 86	25,1	17,0	1,086	2,330	Ja	1,314	2,042	2,750	ja	nein	
MP7.0	Lilli-Friesicke-Str. 17a	10,2	10,0	1,566	2,330	Ja	10,268	2,042	2,750	nein	nein	
MP2.0	Pfaffe-Kai	10,2	10,0	1,567	2,440	Ja	9,869	2,048	2,763	nein	nein	
MP5.0	Am Salzhof	12,0	6,1	2,559	2,440	Nein	9,158	2,048	2,763	nein	nein	
MP6.0	Heinrich-Heine-Ufer Anleger 1	11,9	4,1	3,802	4,600	Ja	6,046	2,093	2,861	nein	nein	

Die Analyse zeigt, dass sich die Mittelwerte der Messstellen Lilli-Friesicke-Straße (MP7.0), Pfaffe-Kai (MP2.0), Am Salzhof (MP5.0) sowie Heinrich-Heine-Ufer (MP6.0) signifikant von denen der Bezugsmessstelle MP0.1 am Luftgütemesscontainer in der Neuendorfer Straße unterscheiden. Der statistische Test stützt die Annahme, dass die Messstelle MP0.1 nicht repräsentativ für Orte abseits der Straße messen kann. Dies war zu vermuten, wo doch bereits die oben vorgestellten kalendarischen Jahresmittelwerte für 2019 dieser vier Messpunkte um etwa 10 µg/m³ von der Messstelle MP0.1 abwichen.

Die NO₂-Jahresmittelwerte für 2019 der beiden Messstellen auf dem Mühlendamm (MP1.1 und MP1.2) weichen lediglich um 2,2 beziehungsweise 2,8 µg/m³ vom Mittelwert der Bezugsmessstelle MP0.1 in der Neuendorfer Straße ab. Auch diese Differenz wird durch den t-Test als signifikanter Unterschied zum Vergleichsstandort erkannt. Damit ist die Messstelle in der Neuendorfer Straße auch für die Standorte der NO₂-Passivsammler auf dem Mühlendamm nicht repräsentativ.

Die verbleibenden Messpunkte MP0.2, MP0.1P und MP0.2P in der Neuendorfer Straße sowie die Messstellen am Molken-

Tab. 3

Ergebnisse der Repräsentativitätsanalyse ausgewählter NO₂-Passivsammler-Messstellen im städtischen Hintergrund Brandenburg a.d.H. Erläuterungen im Text.

Name	Lage	F-Test					t-Test					
		Mittelwert	Varianz	Prüfgröße	kritischer F-Wert	kein signifikanter Unterschied	Prüfgröße	kritischer t-Wert ($\alpha = 0,05$)	kritischer t-Wert ($\alpha = 0,01$)	kein signifikanter Unterschied	wahrscheinlicher Unterschied	
		\bar{x}	s	F	F^*		τ	τ_{95}	τ_{99}			
MP7.0	Lilli-Friesicke-Str. 17a	10,2	10,0	1,000	2,330	ja	0,000	2,042	2,750	ja	nein	
MP2.0	Pfaffe-Kai	10,2	10,0	1,001	2,440	ja	0,028	2,048	2,763	ja	nein	
MP5.0	Am Salzhof	12,0	6,1	1,634	2,440	ja	1,691	2,048	2,763	ja	nein	
MP6.0	Heinrich-Heine-Ufer Anleger 1	11,9	4,1	2,428	4,600	ja	1,144	2,093	2,861	ja	nein	

markt (MP3.0) und in der Mühlentorstraße (MP4.0) zeigen keine statistisch signifikant von der Bezugsmessstelle MP0.1 unterscheidbaren Mittelwerte. Der Referenzmesspunkt misst – wenig verwunderlich – repräsentativ für die benachbarten Punkte direkt in der Neuendorfer Straße. Allerdings repräsentiert er zugleich die Immissionssituation am Molkenmarkt und in der Mühlentorstraße. Oder anders ausgedrückt: dort herrschen gemäß der statistischen Ergebnisanalyse fast identische Verhältnisse.

In einem zweiten Schritt haben wir die Repräsentativitätsanalyse auf die vier Messstellen Lilli-Friesicke-Straße (MP7.0), Pfaffe-Kai (MP2.0), Am Salzhof (MP5.0) und Heinrich-Heine-Ufer (MP6.0) beschränkt, die wir dem städtischen Hintergrund zugeordnet hatten (siehe oben). In Tabelle 3 zeigen wir die Ergebnisse. Die Kollektive aus den Mittelwerten der Messpunkte MP2.0, MP5.0 und MP6.0 unterscheiden sich statistisch nicht signifikant von den Mittelwerten

der Bezugsmessstelle MP7.0 am Luftgütemesscontainer in der Lilli-Friesicke-Straße. Die dauerhaft erfassten Verhältnisse an der bestehenden Hintergrundmessstelle (dort war MP7.0 eingerichtet) sind demnach repräsentativ für die innerstädtischen Situationen am Pfaffe-Kai, am Salzhof und am Heinrich-Heine-Ufer.

Für die Repräsentativitätsanalyse wurden in einem weiteren Schritt auch die Datenkollektive bestehend aus den aus zwei Probenröhrchen gemittelten originalen Messwerten von Juli 2018 bis Dezember 2019/Januar 2020 verwendet. Die Ergebnisse unterscheiden sich qualitativ nicht von den dargestellten Ergebnissen in Tabelle 2 und Tabelle 3.

5 Auswertung

5.1 Bewertung des Messcontainerstandortes

Die Ergebnisse der NO₂-Passivsammler bestätigen, dass der Messcontainer in der Neuendorfer Straße an einem repräsentativen Ort der höchsten Belastung in Brandenburg an der Havel steht. Bei der Überprüfung des Messstandortes wurden weitere potenzielle Belastungsbereiche im Brandenburger Stadtgebiet untersucht. Dabei wurden diese Orte auf der Grundlage der Modellierungsergebnisse des Abschlussberichts zur Fortschreibung des Luftreinhalteplanes ausgewählt. An allen Passivsammler-Messstellen wurden niedrigere NO₂-Jahresmittelwerte ermittelt, als in der Neuendorfer Straße selbst. Daher ist der Standort des Messcontainers in der Neuendorfer Straße weiterhin als der entscheidende Hotspot in Brandenburg an der Havel einzustufen und entspricht weiterhin den Standortkriterien der EU-Luftqualitätsrichtlinie, Anhang III Abschnitt B zur großräumigen Ortsbestimmung der Probenahmestellen.

Im Abschlussbericht zur Fortschreibung des Luftreinhalteplanes wird insbesondere auch eine Überprüfung der Verlegung der Messstelle aus der Neuendorfer Straße in den Bereich Mühlendamm/Molkenmarkt gefordert. Die drei überprüften Punkte auf dem Mühlendamm und am Molkenmarkt weisen im Jahresmittel um 2 bis 4 µg/m³ geringere NO₂-Konzentrationen als die Messstelle in der Neuendorfer Straße auf. Dies spricht nicht für eine Verlegung der Messstelle in diesen Bereich.

Die Probenahmestelle am Messcontainer in der Neuendorfer Straße entspricht darüber hinaus auch der kleinräumigen Ortsbestimmung der Probenahmestellen nach Abschnitt C des Anhangs III der EU-Luftqualitätsrichtlinie. Der vorliegende Bericht liefert damit

sowohl die für die EU-Luftqualitätsrichtlinie unter Abschnitt D des Anhangs III geforderte Dokumentation als auch die Überprüfung der Ortswahl des Messstandortes „Brandenburg an der Havel, Neuendorfer Straße“.

5.2 Vergleich zwischen Ergebnissen der Passivsammler-Messungen und Modellergebnissen

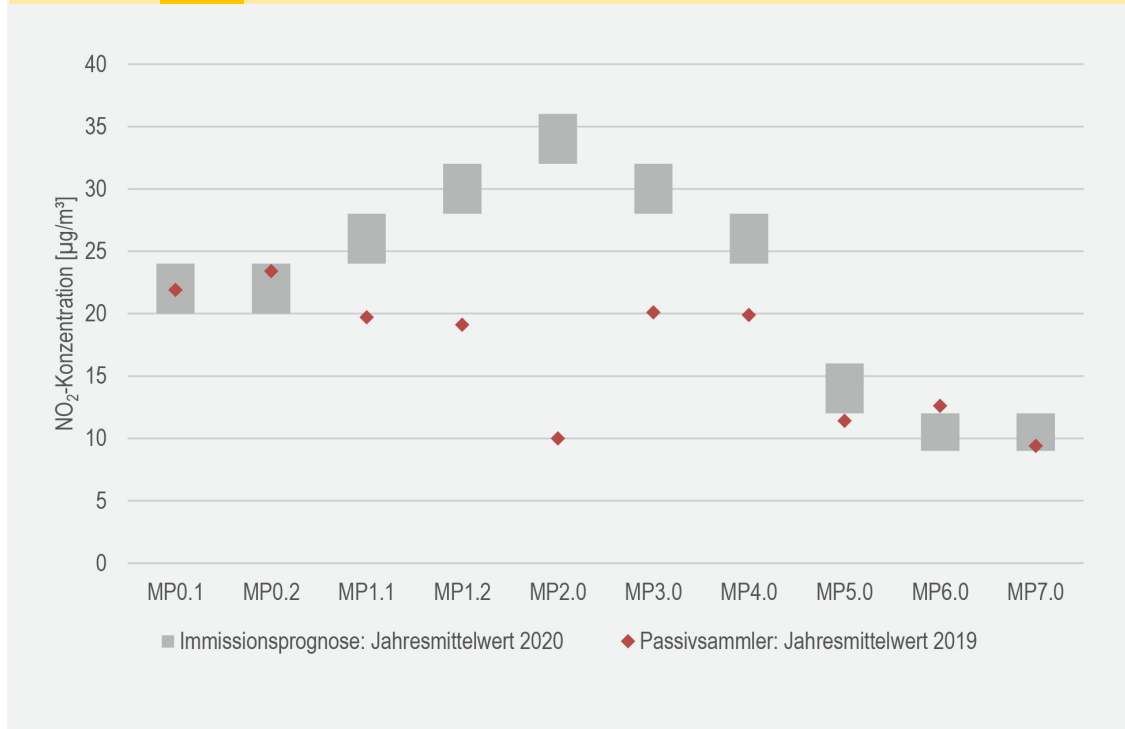
Wie bereits beschrieben war die Grundlage für die Standortwahl der Passivsammler eine Karte mit modellierten NO₂-Immissionen für das Jahr 2014, die im Abschlussbericht zum Luftreinhalteplan Brandenburg an der Havel Fortschreibung 2014/2015 aus dem Jahr 2016 veröffentlicht wurde. An daraus hervorgegangenen Straßenabschnitten potenziell hoher Belastungen wurden schließlich NO₂-Passivsammler-Messungen zwischen Juli 2018 und Dezember 2019 durchgeführt.

Der genannte Bericht enthält auch modellierte Immissionsprognosen für das Jahr 2020 des Brandenburger Stadtgebiets. Abbildung 11 zeigt einen Vergleich zwischen diesen prognostizierten Jahresmittelwerten 2020 und den aus den Passivsammler-Messungen ermittelten Jahresmittelwerten 2019 für alle Messstellen.

Der Vergleich zeigt, dass die Prognosen in der Neuendorfer Straße (MP0.1 und MP0.2) gut mit den Messungen übereinstimmen. Ebenfalls zeigen die Modellierungen und die Messungen an den Anlegestellen am Salzhof (MP5.0) und am Heinrich-Heine-Ufer (MP6.0) sowie an der städtischen Hintergrundmessstelle in der Lilli-Friesicke-Straße (MP7.0) gute Übereinstimmungen beziehungsweise nur minimale Abweichungen voneinander. Für die beiden Messstellen an den Anlegestellen muss jedoch berücksichtigt werden, dass hier die geforderte Datenverfügbarkeit von 90 Prozent nicht erreicht wurde. Bei

Abb. 11

Vergleich mittels Passivsammler ermittelten NO_2 -Jahresmittelwerten 2019 und den NO_2 -Jahresmittelwerten für 2020 aus der Immissionsprognose.



den weiteren Messstellen auf dem Mühlen-damm (MP1.1 und MP1.2), am Molkenmarkt (MP3.0) und in der Mühltorstraße (MP4.0) weichen die Modellergebnisse zwischen 4 und 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ von den Passivsammler-Mess-ergebnissen ab, was einem Unterschied von 21 bis 47 Prozent entspricht.

Noch größer ist der Unterschied zwischen Modellergebnis und Messergebnis an der Messstelle Pfaffe-Kai (MP2.0). Er beträgt hier 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Die erhöhten NO_2 -Konzentrationen der Modellierung ergeben sich womöglich aus den konservativ angesetzten (überschätzenden) Schiffsverkehr-Emissionen für Stickstoffoxide (NOX) in der Modellberechnung. Wie die Messung zeigt, werden diese Emissionen am Standort Pfaffe-Kai nicht tatsächlich realisiert.

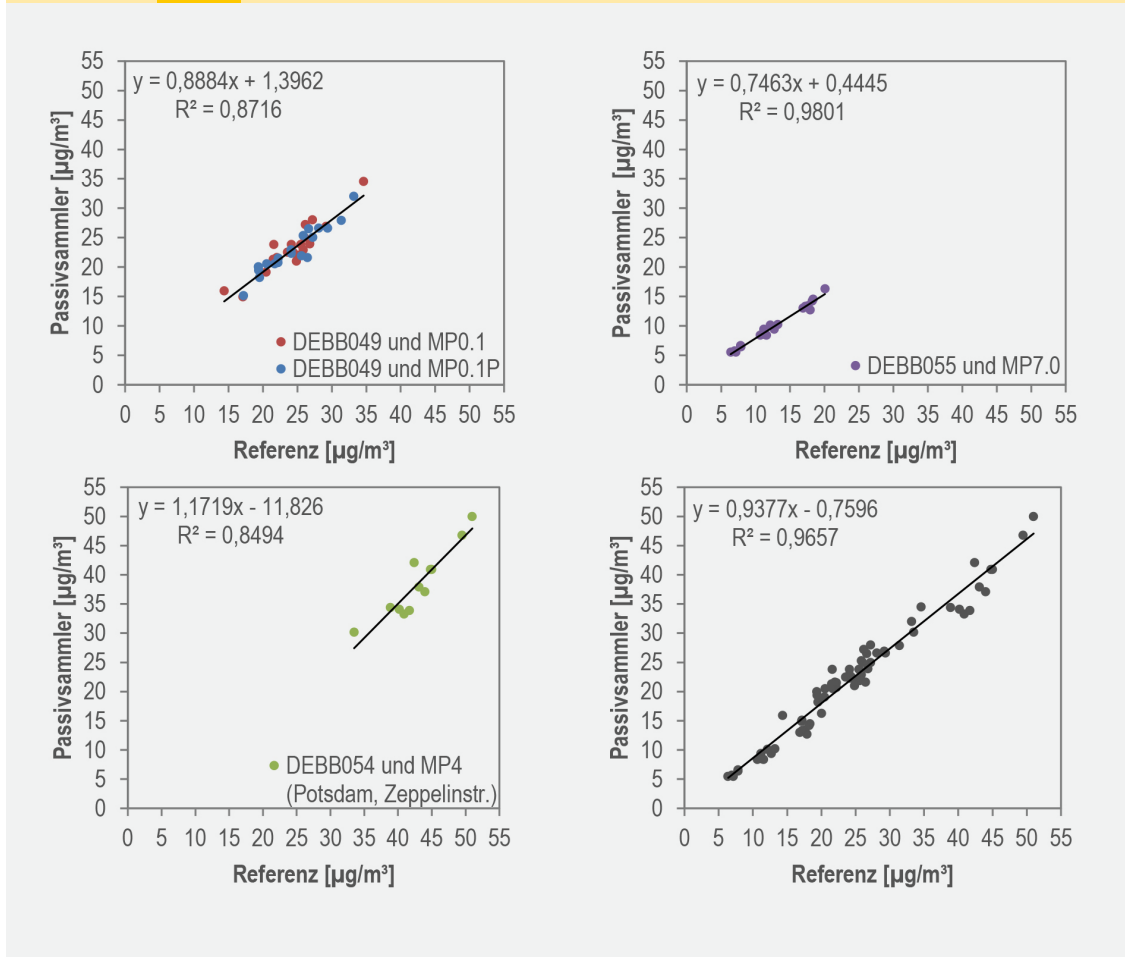
5.3 Vergleich zwischen Ergebnissen der Passivsammler-Messungen und Messungen mit der Referenzmethode

Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der NO_2 -Passivsammler und den Messungen mit dem Referenzverfahren wurde für die zwei Messcontainer-Standorte in der Neuendorfer Straße und in der Lilli-Friesicke-Straße durchgeführt.

Es wurden die NO_2 -Passivsammler-Messungen auf dem Luftgütemesscontainer (DEBB049) in der Neuendorfer Straße – MP0.1 und MP0.1P – verwendet. Um die Datenbasis für die Korrelation mit dem Referenzverfahren zu erhöhen, haben wir am verkehrsbezogenen Containerstandort eine zusätzliche, um zwei Wochen versetzte Parallelmessung (MP0.1P) eingerichtet. Für die

Abb. 12

Vergleich zwischen den Messergebnissen der NO₂-Passivsammler und den Ergebnissen, mit der Referenzmethode. Erläuterungen im Text.



Korrelation liegen somit 38 Messzeiträume vor, für die zunächst die zeitlich exakt korrespondierenden Mittelwerte aus der automatischen Messung (Referenzverfahren) am Container berechnet wurden. Diese wurden den Ergebnissen der Passivsammler gegenübergestellt (Abbildung 12, oben links). Die Korrelation zeigt eine gute Übereinstimmung der beiden Datensätze mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,87.

Am Messcontainer-Standort in der Lilli-Friesicke-Straße (DEBB055, MP7.0) im städtischen Hintergrund konnten wir den Vergleich für 19 Messzeiträume durchführen (Abbil-

dung 12, oben rechts). Hier ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von 0,98.

Auch der Zusammenhang zwischen beiden Methoden aus der Untersuchung in der Potsdamer Zeppelinstraße aus dem Jahr 2016 ist in Abbildung 12 (unten links) dargestellt. Das Diagramm unten rechts in Abbildung 12 vereint alle bisher erhobenen Vergleichsmessungen aus der Neuendorfer Straße und der Lilli-Friesicke-Straße in Brandenburg an der Havel sowie der Zeppelinstraße in Potsdam.

Insgesamt wird an allen Standorten der gute Zusammenhang zwischen den Ergebnis-

sen der NO₂-Passivsammler mit den Messergebnissen der Referenzmethode bestätigt. Die Befunde unterstreichen die Eignung von Passivsammlern für derartige Untersuchungen in einem Stadtgebiet.

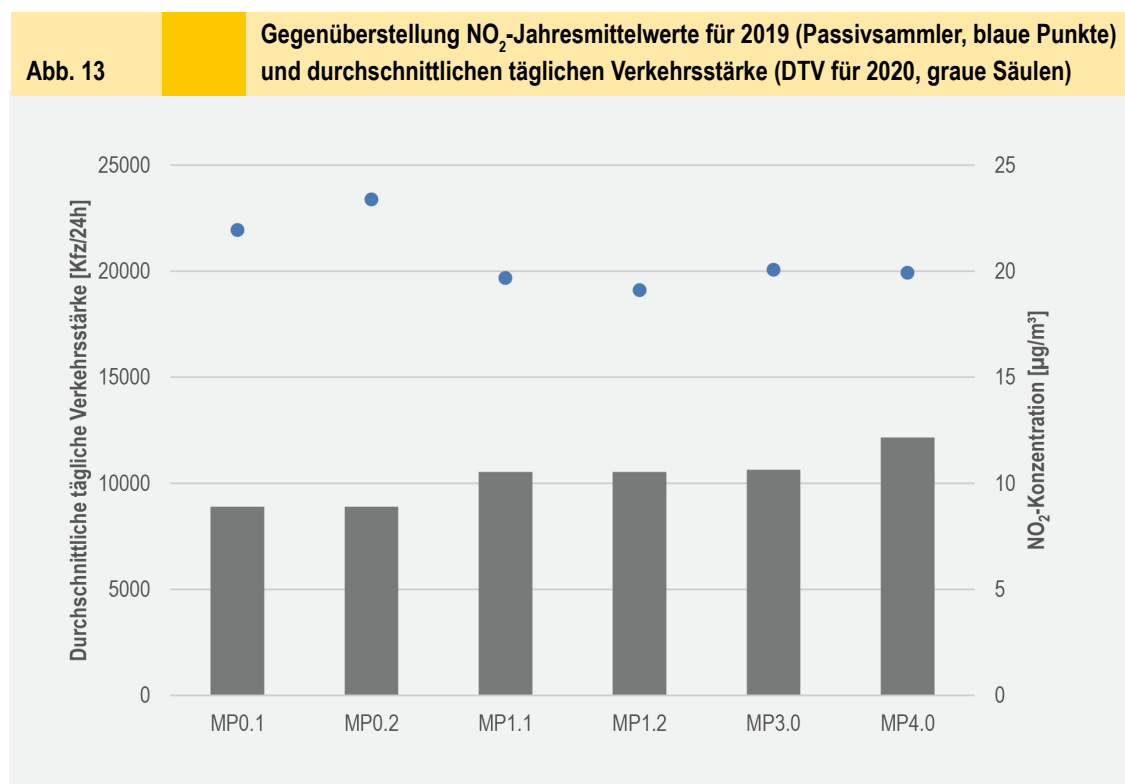
5.4 Gegenüberstellung Passivsammler-Messungen und Verkehrsbelegung

Im LfU liegen für alle verkehrsbezogenen NO₂-Passivsammler-Messstellen aus der Kampagne Jahresmittelwerte der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) für das Jahr 2020 vor. Die Ermittlung erfolgte durch das Ingenieurbüro SVU Dresden im Auftrag des LfU auf der Grundlage von Kurzzeitmessungen im Oktober 2020. Für das Jahr 2019 liegen keine solchen Daten vor.

Eine Gegenüberstellung von DTV-Werten und den Passivsammler-Ergebnissen (Abbildung 13) zeigt, dass die ermittelten NO₂-Jahresmittelwerte nicht mit den erhobenen

Verkehrsstärken korrelieren. Die höchsten NO₂-Jahresmittelwerte wurden an der Messstelle in der Neuendorfer Straße (MP0.1 und MP0.2) ermittelt, hier ist jedoch die Verkehrsstärke mit einem DTV-Wert von 8891 Kfz/24h geringer als an den anderen NO₂-Passivsammler-Messstellen. Im Gegensatz dazu wurden auf dem Mühlendamm (MP1.1 und MP1.2), am Molkenmarkt (MP3.0) und in der Mühlentorstraße (MP4.0) höhere DTV-Werte zwischen 10532 und 12162 Kfz/24h ermittelt. Die NO₂-Jahresmittelwerte liegen hier jedoch zwischen 19,1 und 20,1 µg/m³.

Auch wenn hier durch den Vergleich verschiedener Jahre miteinander Unschärfen bestehen, wird aus der Gegenüberstellung doch deutlich, dass die NO₂-Belastung nicht allein von der Verkehrsstärke am Messort abhängt. Vielmehr wird die NO₂-Belastung durch weitere Faktoren beeinflusst. Dies ist bekannt und begründet sich zum Beispiel durch die Geometrie der Bebauung (Breite



der Straßenschlucht, Höhe der Bebauung) und den Mikrostandort der Messung (zum Beispiel Höhe, Abstand zum Fahrbahnrand, Bedingungen für Ozonchemie).

5.5 Weitere Schlussfolgerungen

Die Messkampagne in Brandenburg an der Havel zeigte nach einer ähnlichen Kampagne in Potsdam im Jahr 2016 zum wiederholten Male, welche Vorteile die NO₂-Messungen mit Passivsammlern bieten. Die Messung ist kostengünstig, die Passivsammler sind einfach installierbar und zudem bieten sie die Möglichkeit, Vergleichsmessungen in verschiedenen Bereichen eines Stadtgebietes praktikabel in den Routinebetrieb eines landesweiten Messnetzes zu integrieren. Weiterhin erfüllt die Methode die Qualitätsanforderungen für ortsfeste Messungen entsprechend der EU-Luftqualitätsrichtlinie beziehungsweise der 39. BImSchV [8].

Aufgrund dieser positiven Erfahrungen werden die NO₂-Passivsammler auch in den folgenden Jahren im Land Brandenburg für Profilvermessungen genutzt, um zum Beispiel die Ortswahl weiterer Messstandorte zu überprüfen und zu dokumentieren. Im Jahr 2021 finden Kampagnen in Frankfurt (Oder) und in Eberswalde statt.

Nachteil der Passivsammlermethode ist die zeitliche Verzögerung von der Messung zum Analyseergebnis. Ebenso ist die zeitliche Auflösung der Werte methodenbedingt auf die Länge des Probenahmezeitraums eingeschränkt, weshalb eine Beurteilung hinsichtlich Kurzzeitgrenzwerten (Ein-Stunden-Grenzwert für NO₂: 200 µg/m³, darf nicht öfter als 18-mal im Kalenderjahr überschritten werden) nicht möglich ist. Im Land Brandenburg ist dies unproblematisch, denn die kontinuierlichen Messungen zeigen seit vielen Jahren keine derartigen Überschreitun-

gen mehr auf. Zudem muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass in Brandenburg an der Havel die Passivsammler Am Salzhof (MP5.0) und am Heinrich-Heine-Ufer (MP6.0) trotz Informationstafel über die unverfängliche Zielstellung der Messung mehrmals beschädigt oder entwendet wurden. Dies führte am Heinrich-Heine-Ufer gar zur Entscheidung, die Messung vorzeitig einzustellen. Die notwendige Datenverfügbarkeit von 90 Prozent im Kalenderjahr konnte nicht mehr erreicht werden. Auch an der Messstelle Am Salzhof (MP5.0) wurde diese Verfügbarkeit letztlich verfehlt.

Zur Überprüfung der Repräsentativität eines Messstandortes wurde für die Auswertung der Brandenburger NO₂-Passivsammlerdaten erstmals eine statistische Methode verwendet, die räumliche Repräsentativität unterstellt, sofern zwischen den zeitgleich erhobenen Datenkollektiven zweier Messstellen kein statistischer Unterschied nachzuweisen ist. Diese Analyse bietet eine Möglichkeit, um vergleichsweise einfach aussagefähig zu diesem Aspekt zu werden. Die vielseitig anwendbare Repräsentativitätsanalyse soll auch für Auswertungen zukünftiger NO₂-Passivsammler-Kampagnen in Brandenburg herangezogen werden.

**Ministerium für Landwirtschaft,
Umwelt und Klimaschutz
des Landes Brandenburg**

Referat Öffentlichkeitsarbeit

Henning-von-Tresckow-Straße 2-13, Haus S,
14467 Potsdam

Telefon: +49 (0)331 866-7237

E-Mail: bestellung@mluk.brandenburg.de

Internet: mluk.brandenburg.de

agrар-umwelt.brandenburg.de

