

Reinigen neue Luftfiltersysteme von urbanem Stickstoffdioxid?

Teilprojekt 4: TLK01-L-77117 „Messnetz“

Schlussbericht
Berichtszeitraum 01.10.2020 bis 31.12.2023

Berichtersteller:

Prof. Dr. Christoph Beck, Lisa Falkenrodt, Verena Fricke M.Sc., Prof. Dr. Andreas Philipp, Carlos Pusch M.Sc., Florian Reich M.Sc., Jonathan Simon M.Sc.

Lehrstuhl für Physische Geographie mit Schwerpunkt Klimaforschung
Institut für Geographie
Universität Augsburg



Anhänge:

- Tagungsbeiträge
- Info-Flyer Messboxpaten
- Forschungsbeilage der Augsburger Allgemeinen (Februar 2022)

Inhaltsverzeichnis

1 Abstract.....	2
2 Aufgabenstellung.....	2
3 Literaturrecherche.....	3
4 Voraussetzungen der Arbeit.....	5
5 Planung und Ablauf der Arbeiten.....	5
5.1 Projektplanung.....	5
5.2 AP 1: Einrichtung und Betrieb des NO ₂ -Messnetzes.....	7
5.3 AP 2: Quantifizierung der synoptischen Rahmenbedingungen.....	16
5.4 AP 3: Statistische Modellierung der raumzeitlichen NO ₂ -Verteilung.....	20
6 Zusammenstellung der Gesamtproblematik und bisher bekannt gewordener Ergebnisse auf dem Gebiet der Aufgabenstellung.....	28
7 Angewandte wissenschaftliche und technische Methoden.....	29
7.1 Technische Methoden.....	29
7.2 Wissenschaftliche Methoden.....	30
8 Während der Durchführung des Teilprojekts 4 der Universität bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen.....	30
9 Darstellung und Bewertung der erzielten Ergebnisse und ihrer praktischen Anwendbarkeit.....	30
10 Zusammenfassung.....	43
11 Ausblick.....	44
12 Referenzen.....	45
Anhang.....	48
Anhang 1 - Tagungsbeiträge.....	48
Anhang 2 - Info-Flyer Messboxpaten.....	52
Anhang 3 - Forschungsbeilage der Augsburger Allgemeinen (Februar 2022). .	53

1 Abstract

In dem vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) finanzierten Verbund-Forschungsvorhaben „Reinigen neue Luftfiltersysteme von urbanem Stickstoffdioxid?“ soll exemplarisch an der Landshuter Allee in München untersucht werden, ob und wie sich aktive Luftreinigungssysteme zur Entfernung von Stickstoffdioxid aus der bodennahen Luft einsetzen lassen, um dessen Konzentration im Umfeld verkehrsreicher Straßen wirkungsvoll zu reduzieren.

Das am Lehrstuhl für Physische Geographie mit Schwerpunkt Klimaforschung der Universität Augsburg angesiedelte Teilprojekt Messnetz beinhaltete im Rahmen der Projektlaufzeit von 01.10.2020 bis 31.12.2023 die Bearbeitung von drei Arbeitspaketen:

- Die Konzeption, den Aufbau und den Betrieb eines NO₂-Messnetzes im Umfeld der Landshuter Allee auf der Basis von kostengünstigen Luftqualitätssensoren.
- Die Charakterisierung der großräumigen synoptischen Rahmenbedingungen – als eine potentielle Einflussgröße der lokalen Luftqualität – mittels Wetterlagenklassifikationen.
- Die statistische Modellierung der raumzeitlichen NO₂-Variabilität im Untersuchungsgebiet.

Der vorliegende Schlussbericht dokumentiert die im Teilprojekt Messnetz durchgeführten Projektarbeiten und fasst die erzielten Ergebnisse zusammen.

2 Aufgabenstellung

Active Luftreinigungssysteme stellen eine potenzielle Möglichkeit zur Verbesserung der Luftqualität im urbanen Raum – insbesondere im Bereich stark verkehrsbelasteter innerstädtischer Straßen – durch eine Konzentrationsminderung von NO₂ dar. Die übergeordnete Fragestellung des Projektes „Reinigen neue Luftfiltersysteme urbanes Stickstoffdioxid?“ war, ob und in welchem Umfang eine wirksame Minderung der NO₂-Konzentrationen durch die entlang eines Abschnitts der Landshuter Allee in München installierten Luftreinigungssysteme nachgewiesen werden kann.

Das Teilprojekt Messnetz hatte die Aufgabe, die NO₂-Konzentrationen im erweiterten Umgebungsbereich der entlang der Landshuter Allee installierten Luftreinigungssysteme auf der Grundlage eines Messnetzes von Low-Cost-Messsystemen zu erfassen.

Die mittels statistischer Modelle abgeschätzte räumliche und zeitliche Variabilität der NO₂-Konzentration im Untersuchungsgebiet sollte in Abhängigkeit der großräumigen synoptischen – erfasst durch objektiv ermittelte Wetterlagen – und der lokalen meteorologischen Rahmenbedingungen sowie relevanter Umgebungsparameter (z. B. Entfernung und Ausrichtung zur Hauptemissionsquelle Landshuter Allee) charakterisiert werden.

Durch die Berücksichtigung der installierten Luftreinigungssysteme und ihrer zeitlich variablen Betriebszustände im Rahmen der Analysen sollte eine Einschätzung der raumzeitlich variierenden Wirksamkeit von Luftreinigungssystemen ermöglicht werden, aus der Hinweise für deren optimierten und zielgerichteten Betrieb abgeleitet werden können.

3 Literaturrecherche

Die im Teilprojekt Messnetz durchgeführten Arbeiten berücksichtigten in allen Arbeitspaketen den aktuellen, in der relevanten Fachliteratur dokumentierten Kenntnisstand, der nachfolgend für die einzelnen thematischen Schwerpunkte des Teilprojekts kurz skizziert wird.

Abschätzung von NO₂-Konzentrationen aus low-cost Messungen

NO₂-Messungen der lokalen Immissionsbelastungen, die im Rahmen amtlicher Messnetze an Einzelstandorten durchgeführt werden, können die raumzeitliche Variabilität der NO₂-Konzentrationen innerhalb komplexer urbaner Strukturen nicht adäquat abbilden. Dazu sind kontinuierliche Konzentrationsmessungen in hoher räumlicher Auflösung notwendig. Häufig werden dazu als Ergänzung zu den amtlich qualitätsgesicherten NO₂-Messungen sogenannte low-cost Sensoren eingesetzt, welche relativ kostengünstig sind und zusätzlich die Möglichkeit bieten eine räumliche Ausweitung sowie Verdichtung der NO₂-Messungen zu realisieren. Diese low-cost Sensoren beruhen häufig auf elektrochemischen Messverfahren zur Erfassung der NO₂-Konzentration (Zuidema et al. 2018, Bigi et al. 2018, Mijling et al. 2018, van Zoest et al. 2019, Concas et al. 2021, Han et al. 2021).

Im Gegensatz zu qualitätsgesicherten amtlichen Messsystemen müssen aus low-cost Messwerten mittels sogenannter Kalibrierungsverfahren zunächst Absolutwerte der NO₂-Konzentration abgeschätzt werden. Generell weisen low-cost Messsysteme darüber hinaus eine niedrigere Sensitivität und eine höhere Querempfindlichkeit zu anderen Gasen (vor allem Ozon) sowie eine Tendenz zu einer Alterung der elektrochemischen Zellen und damit zu einer Sensordrift auf (Bigi et al. 2018, Mijling et al. 2018, van Zoest et al. 2019, Bisignano et al. 2022). Die Zuverlässigkeit und Qualität von low-cost Sensoren hat aber in den letzten Jahren bezüglich der genannten Punkte erheblich zugenommen, so dass diese Messsysteme eine aktuell in einer Vielzahl von Studien verwendete Möglichkeit zur räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Erfassung der NO₂-Konzentrationen in urbanen Umgebungen darstellen. Zusätzliche Ozon (O₃-), Temperatur- und Feuchtemessungen können die Ergebnisse der NO₂-Abschätzung aus low-cost Messungen optimieren (Mijling et al. 2018, Bisignano et al. 2022). Zudem können häufig auftretende Alterungseffekte der Sensoren durch eine Driftkorrektur kompensiert werden (Mijling et al. 2018, Concas et al. 2021).

Für eine Abschätzung der NO₂-Konzentrationen aus den elektrischen Signalen der Messsensoren können verschiedene Modellansätze wie etwa lineare multiple Regressionen angewendet werden. Daneben gibt es auch fortgeschrittene nichtlineare Ansätze des Maschinellen Lernens wie Random Forest, Ranger Random Forest, Gradient Boosting sowie Radial Support Vector Machine. Innerhalb der verschiedenen Modelle können verschiedene Parameter systematisch variiert werden, um mittels Hyperparametertuning die einzelnen Modelle zu optimieren. Die verschiedenen Modelle werden auf die Messdaten angewendet, mittels Kreuzvalidierungsansätzen evaluiert und bezüglich ihrer Performance verglichen (Bigi et al. 2018, Mijling et al. 2018, Concas et al. 2021, Bisignano et al. 2022, Kang et al. 2022).

Quantitative Kennzeichnung der synoptischen Rahmenbedingungen mittels Wetterlagenklassifikationen

Wetterlagenklassifikationen stellen einen bewährten grundlegenden Ansatz zur Charakterisierung atmosphärischer Zirkulationsdynamik und zur weiterführenden synoptisch-klimatologischen Analyse der Zusammenhänge zwischen großräumigen atmosphärischen Prozessen und verschiedenen Klima- und Umweltvariablen auf der regionalen und lokalen Skala dar (z. B. Huth et al. 2008).

Zur Klassifikation steht eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung, die unterschiedlichen übergeordneten Methodengruppen zugeordnet werden können (z. B. Philipp et al. 2010), deren Eignung für die Bearbeitung unterschiedlicher Fragestellungen in verschiedenen Arbeiten untersucht und bewertet wurde (z. B. Beck & Philipp 2010, Huth et al. 2016). Als in vielen Anwendungsfällen zu bevorzugende Klassifikationsverfahren wurden hierbei zum einen Optimierungsverfahren – insbesondere clusteranalytische Ansätze – (z. B. Philipp et al. 2007) und zum anderen sogenannte schwellenwertbasierte Verfahren, bei denen großräumige Anströmrichtung und Vorticity zur Klassifikation herangezogen werden (z. B. Beck et al. 2007) identifiziert. Vor allem Vertreter der letztgenannten Gruppe von Klassifikationsansätzen wurden von verschiedenen Autoren erfolgreich im Rahmen der synoptisch-klimatologischen Analyse der Variabilität von Luftqualitätsparametern eingesetzt (z. B. Tang et al. 2009, Beck et al. 2014) und fanden insbesondere auch in Untersuchungen zu synoptischen Einflüssen auf NO₂-Konzentrationen in urbanen Umgebungen Verwendung (z. B. Grundström et al. 2014, Pope et al. 2015, Russo et al. 2015). Neben dem verwendeten Klassifikationsalgorithmus sind eine Reihe von Klassifikationsparametern relevant für die Aussagekraft der Klassifikationsergebnisse (z. B. Beck & Philipp 2010, Beck et al. 2015, Beck et al. 2016, Huth et al. 2016). Hierzu gehören insbesondere die Anzahl der Klassen/Wetterlagen, der räumliche Ausschnitt und die klassifizierten Variablen.

Statistische Analyse der raumzeitlichen NO₂-Variabilität

Zur Quantifizierung der kleinräumigen raumzeitlichen Verteilungsmuster von Luftqualitätsparametern in urbanen Räumen und zu deren Erklärung in Abhängigkeit relevanter Einflussgrößen können verschiedene statistische Modellierungsansätze eingesetzt werden (z. B. Azmi et al. 2023, Rybarczyk & Zalakeviciute 2018). Neben multivariaten linearen Modellen (z. B. Araki et al. 2018, Chen 2020, Lu et al. 2020, Shairsing et al. 2021) kommen dabei auch verstärkt nichtlineare Ansätze des Maschinellen Lernens zum Einsatz (z. B. Rybarczyk & Zalakeviciute 2018). Aus der Gruppe der letztgenannten statistischen Modellierungsansätze haben sich insbesondere auf sogenannten Random Forests basierende Ansätze zur Modellierung von Luftqualitätsparametern bewährt und dabei in ihrer Leistungsfähigkeit klassische lineare Ansätze häufig übertroffen (z. B. Araki et al. 2018, Rybarczyk & Zalakeviciute 2018, Jain et al. 2021).

Bezüglich der in den Modellansätzen berücksichtigten Einflussgrößen können Modelle, die ausschließlich zeitlich invariante – mehrheitlich räumliche – Prädiktoren (z. B. Entfernung zu Emissionsquellen) einbeziehen (z. B. Luminati et al. 2021) unterschieden werden von Modellen, die ergänzend auch zeitabhängig variierende Prädiktoren (z. B. meteorologische Einflussgrößen) in die Modelldefinition aufnehmen (z. B. Araki et al. 2018, Jain et al. 2021).

Aus der Entwicklung und Anwendung geeigneter Modelle lässt sich zunächst eine Quantifizierung der Relevanz der maßgeblichen modifizierend wirksamen

Einflussgrößen des jeweils betrachteten Luftqualitätsparameters ableiten. Eine hinreichende Modellgüte vorausgesetzt werden darüber hinaus quantitative Abschätzungen der Schadstoffkonzentrationen – etwa von NO₂ – an Standorten ohne verfügbare Messwerte möglich (z. B. Araki et al. 2018, Jain et al. 2021).

4 Voraussetzungen der Arbeit

Für die initiale Einrichtung, die sukzessive Anpassung und Erweiterung und den Betrieb des im Teilprojekt realisierten Low-Cost-NO₂-Messnetzes an der Landshuter Allee waren eine Reihe von Voraussetzungen zu erfüllen.

Diese beinhalteten zum einen behördliche Genehmigungen für die Installation der Messsysteme an – aus Projektsicht – möglichst geeigneten Standorten im Untersuchungsgebiet. Zum anderen fiel hierunter die Bereitstellung nötiger Infrastruktur zur Stromversorgung und zur Datenanbindung der Messsysteme. Bezüglich beider Aspekte erfolgte eine vielfältige und kontinuierliche Unterstützung durch verschiedene Behörden der Landeshauptstadt München.

Der für die Durchführung der essentiell wichtigen Vergleichsmessungen an der Station Landshuter Allee des Lufthygienischen Landesüberwachungssystems Bayern (LÜB) nötige wiederholte Zugang zur Station und die Nutzung der dortigen Infrastruktur wurden durch das Bayerische Landesamt für Umwelt ermöglicht.

Für die Herstellung einzelner Komponenten der Low-Cost-Messsysteme und für deren Zusammenbau wurden die Räumlichkeiten und die Ausstattung der lehrstuhleigenen Werkstatt am Institut für Geographie der Universität Augsburg genutzt.

Zur Durchführung der teils sehr rechenzeitintensiven Analysen – in den Arbeitspaketen AP 2 und AP 3 – konnte das vom Institut für Geographie und dem Institut für Physik gemeinschaftlich betriebene Augsburger Linux Compute Cluster (ALCC) an der Universität Augsburg genutzt werden.

5 Planung und Ablauf der Arbeiten

5.1 Projektplanung

Entsprechend der Projektplanung des Gesamtprojektes war auch das Teilprojekt Messnetz über seine dreijährige Laufzeit (Oktober 2020 bis Dezember 2023) in zwei Phasen gegliedert (siehe auch Abbildung 1). Nach Beendigung von Phase 1 sollte hierbei eine Synthese der in Phase 1 durchgeführten Feldarbeiten – im Falle von Teilprojekt Messnetz insbesondere die Einrichtung und der Betrieb des Low-Cost-NO₂-Messnetzes – stattfinden und nötigenfalls eine Anpassung für die nachfolgende Phase 2 des Projekts erfolgen. Zeitliche Verzögerungen der Projektarbeiten und damit auch Verschiebungen des Überganges von Phase 1 zu Phase 2 ergaben sich im Teilprojekt Messnetz insbesondere als Folge von Einschränkungen im Zuge der COVID-19-Pandemie. So konnten etwa – bedingt durch Zugangsbeschränkungen an der Universität Augsburg – der Zusammenbau und die Konfiguration der Messboxen nur zum Teil in der Werkstatt des Lehrstuhls stattfinden und mussten stattdessen zu großen Anteilen im Home-Office der Projektbeteiligten durchgeführt werden.

Tabelle 1: Überblick der Arbeitspakete des TP Messnetz.

	Phase 1				Phase 2							
	1-3	4-6	7-9	10-12	Projektmonat							
					13-15	16-18	19-21	22-24	25-27	28-30	31-33	34-36
Einrichtung und Betrieb des NO₂-Messnetzes												
AP 1												
Einrichtung des Messnetzes	■											
Betrieb des Messnetzes in Phase 1		■										
Gegebenenfalls Anpassung des Messnetzes				■	■							
Betrieb des Messnetzes in Phase 2					■							
Quantifizierung der synoptischen Rahmenbedingungen												
AP 2												
Entwicklung objektiver Wetterlagenklassifikationen	■											
Retrospektive und prospektive Wetterlagenklassifikation				■	■							
Statistische Modellierung der raumzeitlichen NO₂-Verteilung												
AP 3												
Entwicklung und Validierung der Modelle					■							
Durchführung modellbasierter Analysen								■				
Zwischenbericht				■				■				
Synthese und Abschlussbericht											■	

5.2 AP 1: Einrichtung und Betrieb des NO₂ -Messnetzes

Konzeption und Vorbereitung der Messstandorte

Das im Teilprojekt Messnetz einzurichtende low-cost NO₂-Messnetz intendierte die Erfassung der NO₂-Konzentrationen im Nahbereich und im erweiterten lokalen Umfeld der entlang der Landshuter Allee installierten Luftreinigungssysteme in hoher zeitlicher und möglichst hoher räumlicher Differenzierung.

Die Planung und Vorbereitung der Standorte für den Betrieb der Low-Cost Messsysteme erfolgte in Abstimmung mit den Projektpartnern (TP Luft), den zuständigen Behörden der Stadt München und nicht zuletzt mit Anwohnern, die für einige Messstandorte mit in die Planung einbezogen wurden.

Im Rahmen gemeinsamer Vor-Ort-Termine (im Februar und März 2021) mit den Projektpartnern (Uni Bayreuth, OTH Regensburg, TU München), dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) sowie Beteiligten der Landeshauptstadt München (Referat für Gesundheit und Umwelt, Baureferat, Kreisverwaltungsreferat, Referat für Stadtplanung und Bauordnung, Stadtwerke München GmbH, SWM) wurden potenzielle Standorte für die Luftreinigungssysteme und für die low-cost Messsysteme am Untersuchungsstandort Landshuter Allee eruiert. Bezüglich der low-cost Messsysteme wurden hierbei sowohl die aus wissenschaftlicher Sicht präferierten Standorteigenschaften (ca. 20 Standorte in variierender Entfernung zur Landshuter Allee und den zu installierenden Luftreinigungssystemen, möglichst gleichmäßig in 2 m - 2,5 m Höhe über das Untersuchungsgebiet verteilt) als auch die lokalen Gegebenheiten bzgl. verkehrs- und vandalismussicherer Installation sowie der Möglichkeit zur Bereitstellung einer Strom- und Datennetzanbindung berücksichtigt.

In Frage kommende - zeitnah realisierbare - Standorte wurden insbesondere in unmittelbarer Nähe einiger Stromverteilerkästen der Stadtwerke München und an bzw. in Nähe der zur Stromversorgung der Luftreinigungssysteme geplanten

Traversenkonstruktion auf der Westseite der Landshuter Allee identifiziert. Für diese insgesamt elf Standorte folgte die Detailplanung und weitere Abstimmung mit dem Kreisverwaltungsreferat (Erteilung von Sondernutzungsgenehmigungen), den Stadtwerken München (Strombereitstellung an Verteilerkästen), dem Baureferat Gartenbau G 21-5 der Landeshauptstadt München (Genehmigung zur Anbringung von Messsystemen an Straßenbäumen), dem Projektpartner des Teilprojekt Luft an der Uni Bayreuth (Anbindung von low-cost Messsystemen an Stromversorgung der Luftreinigungssysteme) sowie Anwohnern/Hauseigentümern (Anbringung von Messsystemen an privat oder gewerblich genutzten Gebäuden).

Einige aus inhaltlichen Erwägungen sehr wünschenswerte Standorte stellten sich als absehbar nicht realisierbar heraus. Dies betraf zum einen die Messstandorte an Laternen auf den mittleren Fahrstreifenbegrenzungen und entlang der Ostseite der Landshuter Allee, für die keine Stromanbindung realisierbar war. Zum anderen aber auch ergänzende Messstandorte in variierenden Entfernungen zur Landshuter Allee in den von der Landshuter Allee wegführenden Seitenstraßen (keine Stromversorgung und/oder verkehrssichere Anbringung mit vertretbarem Aufwand möglich).

Um ergänzende Standorte - vor allem im Bereich der Seitenstraßen - realisieren zu können, wurde in Abstimmung mit dem Ministerium ein Info-Flyer an Anwohner und Gewerbetreibende verteilt und damit zum einen zum Projekt informiert und zum anderen aktiv um eine Beteiligung am Messprojekt durch „Betreuung“ eines Messsystems z. B. auf dem Balkon gebeten.

Konfiguration der low-cost Messsysteme

Die low-cost Messsysteme beinhalten als zentrale Elemente kostengünstige, aber leistungsstarke Sensoren von Alphasense (NO₂ und O₃; Alphasense - NO₂ 2019, Alphasense - O₃ 2019) und Sensirion (Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit; Sensirion 2021). Die elektrochemischen 4-Elektroden Sensoren von Alphasense; B43F (NO₂) und OX-B431 (O₃) wurden auf Grund ihrer nachgewiesenen Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit, bei gleichzeitig kompakter Größe ausgewählt. Für den digitalen, hochpräzisen und langzeitstabilen Feuchtesensor SHT85 (RH/T) lagen positive Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten der Arbeitsgruppe vor. Der Aufbau eines Low-Cost Messsystems ist in Abbildung 2 veranschaulicht. Als Hauptplatine findet ein Einplatinencomputer (Raspberry Pi Zero W, mit 32 GB Speicherkarte) Verwendung. Zur Steuerung der Stromversorgung wird ein StromPi 3 verwendet und mit einem 1000mAh Akku (Batterie Hat) zur Überbrückung kurz andauernder Stromausfälle verbunden. Die Datensicherung erfolgt lokal, dazu dient ein 128 GB USB-Datenstick. Für die Kommunikation zwischen den Sensoren und dem Computer dienen zwei I2C serielle Datenbusse. Der Aufbau der Messboxen in einem witterungsbeständigen Plastikgehäuse (24cm x 16cm x 12cm) erfolgte mittels eigens entworfener und mit 3D-Drucker beziehungsweise Lasercutter hergestellter Bauteile. Basierend auf dem Betriebssystem Raspberry Pi OS ist die Sensorsteuerung, Datenverwaltung und - bei verfügbarer Datenanbindung - Kommunikation und Messdatenübertragung auf einen zentralen Server mittels Unix-Shell Skripten und Python Skripten realisiert, die im Projektverlauf angepasst, erweitert und optimiert wurden.

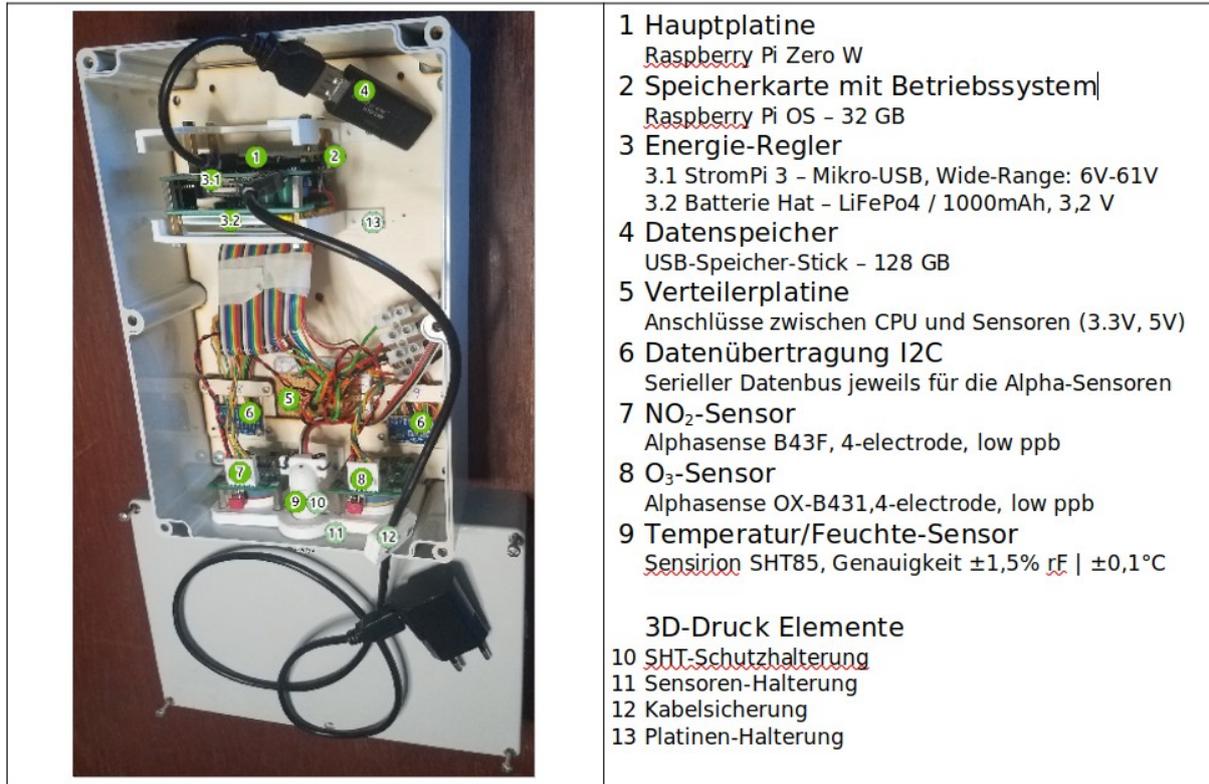


Abbildung 2: Aufbau eines Low-Cost Messsystems.

Die hardware- und softwareseitige Konfiguration der Messsysteme wurde durch die COVID-19-Pandemie in erheblichem Maße erschwert und verzögert. Als wesentliches einschränkendes Moment ist hier insbesondere die stark eingeschränkte Zugänglichkeit und Nutzbarkeit von Werkstattträumen am Geographischen Institut der Universität Augsburg zu nennen, die eine teilweise Verlagerung von Konstruktion, Zusammenbau und Testbetrieb der Messsysteme in die „Home-Werkstätten“ der MitarbeiterInnen notwendig machte.

Einrichtung und Betrieb des Messnetzes

Vor Ausbringung der ersten low-cost Messsysteme an den geplanten Standorten des Messnetzes erfolgten im Juli 2021 erste Vergleichsmessungen an der LÜB-Station München Landshuter Allee des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) und an der LÜB-Station Augsburg-Königsplatz des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU). Solche Vergleichsmessungen an Referenzstationen, die im Projektverlauf insgesamt dreimal durchgeführt wurden, sind Voraussetzung für die sogenannte Kalibrierung der low-cost Messungen mittels statistischer Modellierungsansätze (siehe Kap. 5.4). Die low-cost Messsysteme wurden für diese Vergleichsmessungen jeweils in möglichst unmittelbarer Nähe zum NO₂-Referenzmessgerät auf dem Dach der LÜB-Station angebracht.

Nach Beendigung der ersten Vergleichsmessungen erfolgte die Installation einer ersten Gruppe von Messsystemen an genehmigten Standorten des Messnetzes. Eine low-cost Messbox verblieb über die gesamte Projektlaufzeit auf dem Dach der LÜB-Station. Die ersten genehmigten und ab Sommer 2021 mit Messboxen bestückten Standorte waren jene in unmittelbarer Nähe von Stromverteilerkästen der Stadtwerke München und – etwas später – diejenigen für die eine Anbindung an die Stromversorgung der Luftreinigungssysteme eingerichtet werden konnte (Standorte

an der Stromversorgungstraverse der Luftreinigungssysteme und an Straßenbäumen).

Die Standorte dieser ersten Aufbaustufe können der Übersichtskarte des Messnetzes in Abbildung 3 (Signatur „ab frühestens 06/21“) sowie Fotos ausgewählter Standorte Abbildung 4 entnommen werden.

Ab Frühjahr 2022 konnten insgesamt vier Messsysteme bei Privathaushalten installiert werden (Signatur „ab 03/22 bis 03/23“ in Abbildung 3, Abbildung 4). Es lagen zwar Interessensbekundungen weiterer AnwohnerInnen vor, diese konnten aber aufgrund wissenschaftlicher Erwägungen nicht bei der Messnetzplanung berücksichtigt werden, weil sie sich beispielsweise auf Standorte deutlich außerhalb des Untersuchungsgebietes bezogen.



Abbildung 3: Übersichtskarte der Messstandorte des TP Messnetzes. Die Ziffern an den Standortsignaturen verweisen auf die Einträge in der Messnetztafel (Tabelle 2).

Ab Sommer 2022 konnten weitere Messsysteme an Standorten (Laternen auf Seiten- und Mittelstreifen der Landshuter Allee) ohne verfügbare externe Stromversorgung eingerichtet werden, nachdem – nach teils sehr langwierigen Verfahren – entsprechende Genehmigungen von behördlicher Seite vorlagen (Signatur „ab frühestens 08/22 bis 09/23“ in Abbildung 3). Die eigentlich geplante Installation von 30 Watt Solarpaneelen an diesen Standorten, zur Gewährleistung der Stromversorgung, konnte mangels Genehmigung leider nicht umgesetzt werden. Die genehmigte Alternativlösung mit Akku und 200Ah Pufferbatterie erwies sich im weiteren Projektverlauf als teils unzuverlässig und äußerst wartungsaufwändig (Abbildung 6, links & mitte).

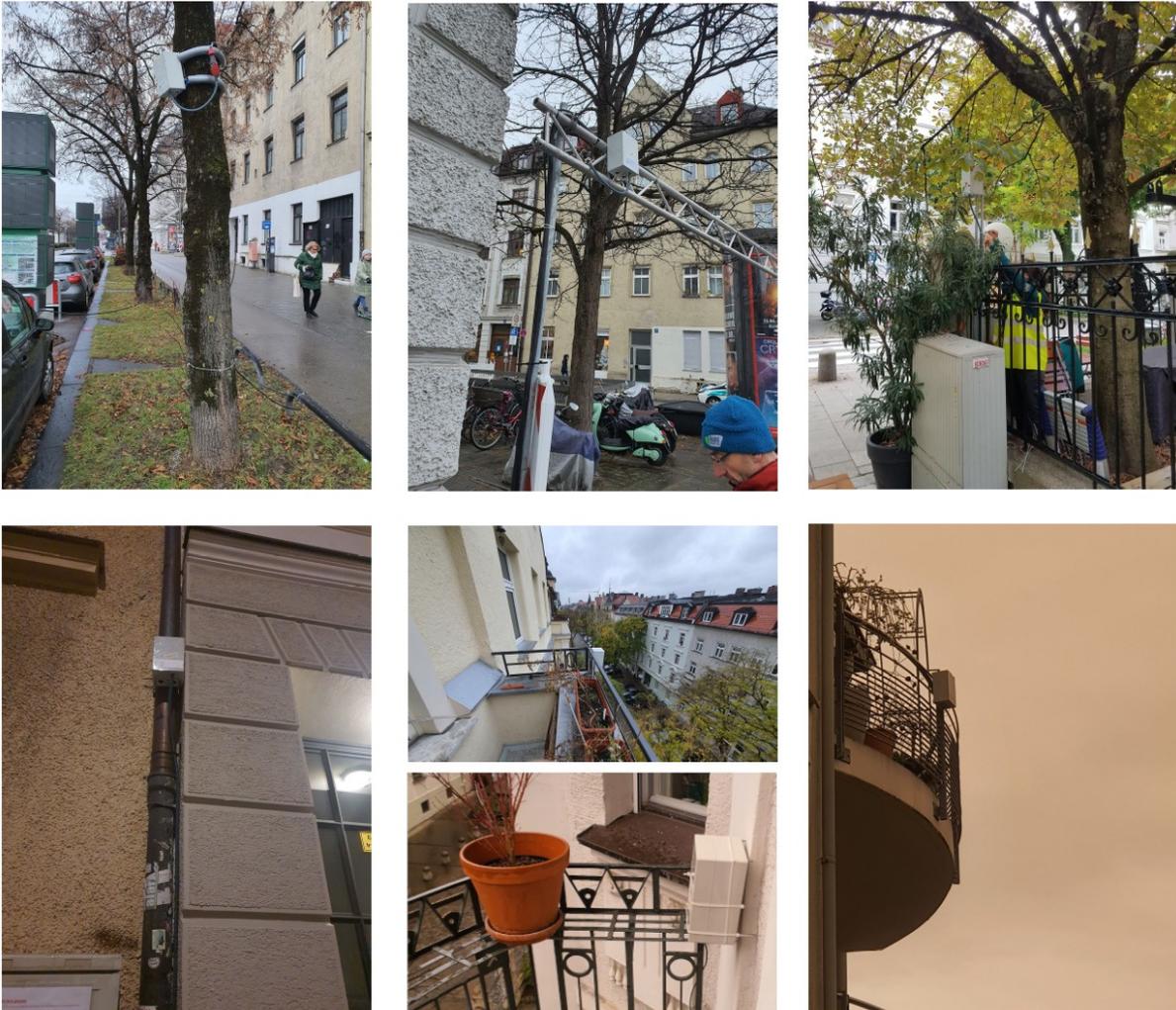


Abbildung 4: Low-Cost Messsysteme an unterschiedlichen Standorten.

Ebenfalls im ersten Quartal 2022 wurde durch die Stadtwerke München dankenswerterweise ein WLAN-Hotspot an der Landshuter Allee eingerichtet. Die Nutzung dieses Hotspots vereinfachte die Funktionskontrolle, Softwareanpassung und Datenübertragung zu und von den Messsystemen im Einzugsbereich des Hotspots (ca. die Hälfte der installierten Systeme). Die automatisierte kontinuierliche Datenübertragung zum Datenserver an der Uni Augsburg konnte nur mit Einschränkungen realisiert werden.



Abbildung 5: Aufbau der 2. Vergleichsmessung an der LÜB Landshuter Allee.

Im Juni 2022 wurden alle Low-Cost Messsysteme erneut auf der LÜB-Station Landshuter Allee aufgebaut und eine zweite einmonatige Vergleichsmesskampagne zur Kalibrierung der low-cost Sensoren vorgenommen (Abbildung 5). Anschließend wurden alle Messsysteme wieder an den Messstandorten installiert.

Begleitend und ergänzend zu den projektbezogenen low-cost Messungen wurden – im Rahmen eines außerhalb des Projekts durchgeführten Promotionsvorhabens – vor der Inbetriebnahme der Luftreinigungssysteme, an zwei Bäumen an der Landshuter Allee Proben der Gewöhnlichen Gelbflechte (*Xanthoria parietina*) genommen. An sechs genehmigten Standorten wurden im Dezember 2021 – neben low-cost Messboxen – 20 x 20 cm große Holzrahmen mit flechtenbewachsenen Zweigen angebracht, die als aktive Bioindikatoren dienen und auf Ihren Stickstoffgehalt untersucht werden (Abbildung 6, rechts). Im November 2022 wurde eine erste Flechtenernte vorgenommen und ins Labor des bay. Landesamtes für Forst geschickt.



Abbildung 6: Stromversorgung mittels Akku und Pufferbatterie an Laternen-Standorten (links und mitte); Rahmen zur Flechten Bioindikation an low-cost Messstandort (rechts).

Eine umfangreichere sachbezogene Anpassung des low-cost Messnetzes erfolgte ab März 2023. Nachdem erste Datenauswertungen eine räumliche Begrenzung der Luftreinigungssysteme auf den unmittelbaren Nahbereich nahelegten, wurden insgesamt sechs Messsysteme im Nahfeld des Luftreinigungssystems an der Einmündung der Schlörstraße (LRS 13) aufgebaut, mit dem Ziel eine potentielle Reinigungswirkung im Nahbereich differenziert zu erfassen (Abbildung 7). Hierfür wurden die drei Messboxen von den Privathaushalten und zwei weitere – im Vorfeld nicht betriebene – Messboxen im Abstand von 1,7 m bis 11 m zur LRS 13 und in Höhen von 1,7 m bis 3 m aufgebaut (Signatur „ab frühestens 03/23 bis 09/23“ in Abbildung 3).



Abbildung 7: Messaufbau im Nahbereich des Luftreinigungssystems 13.

Im September 2023 erfolgte der Abbau aller Messsysteme und die nochmalige Anbringung aller Messboxen auf dem Dach der LÜB-Station Landshuter Allee (LA), für eine dritte und letzte Vergleichsmesskampagne. Die Vergleichsmessungen wurden am 03. November 2023 beendet. Alle Standorte wurden ordnungsgemäß, wie in den jeweiligen Sondernutzungsgenehmigungen festgelegt, rückgebaut.

Abbildung 8 zeigt Ausschnitte der Tätigkeiten an der Landshuter Allee: Wartung und Reparatur eines Messsystems, Material- und Werkzeugtransport, sowie Messboxkontrollen und Datenauslese während einer Vergleichsmesskampagne. Eine Übersicht der im Projektverlauf realisierten Messstandorte ist in Tabelle 2 enthalten. Abbildung 9 gibt einen Überblick der Datenverfügbarkeit der Messsysteme.



Abbildung 8: Wartung und Reparatur eines Messsystems (links); Material- und Werkzeugtransport (mitte); Messboxkontrolle und Datenauslese während einer Vergleichsmesskampagne (rechts).

Nr. Low-Cost Messsysteme	Interne Bezeichnung	Lat	Lon	Installation/Strom	Entfernung zur		Höhe in m	Sichtlinie zur LA	Ausrichtung zur LA
					LA in m	next LRS in m			
1	LA1	48.15062	11.53659	Baum	3	4,5	2,5	ja	westlich
2	Biergarten	48.15032	11.53848	Verteilerkasten	99	140	2	ja	östlich
3	Cafe	48.15022	11.53505	Verteilerkasten	115	109	3,5	nein	westlich
4	LA4	48.14983	11.53652	Traverse der LRS	3	10	3	ja	westlich
5	LÜB	48.14957	11.53654	LÜB-Station	0	13	3,5	ja	westlich
6	Laterne Blut	48.15059	11.53724	Akku/Batterie	3,5	46	3	ja	östlich
7	Gümbelstr_Innenhof	48.15095	11.53849	Privathaushalt	95	145	9	nein	östlich
8	Diakonie	48.14989	11.53720	Verteilerkasten	8	48	2,5	ja	östlich
9	LA2	48.15028	11.53657	Traverse der LRS	4,4	6,3	3	ja	westlich
10	Laterne_Schlörstr	48.15023	11.53673	Akku/Batterie	0	16	3	ja	westlich
11	LA6	48.14920	11.53650	Traverse der LRS	3	7,7	3	ja	westlich
12	Laterne_Diako	48.15006	11.53713	Akku/Batterie	1,5	44	3	ja	östlich
13	Laterne_Rewe	48.14919	11.53708	Akku/Batterie	4	42	3	ja	östlich
14	Traverse_Wand_unten	48.15027	11.53648	Traverse der LRS	10	11	1,7	ja	westlich
15	LA3	48.15009	11.53647	Traverse der LRS	9,6	5,7	3	ja	westlich
16	Hinterhaus_Rewe	48.14889	11.53807	Privathaushalt	81	119	6	nein	östlich
16	Traverse_Mitte	48.15028	11.53652	Traverse der LRS	7,5	8,5	3	ja	westlich
17	Laterne_LÜB	48.14949	11.53668	Akku/Batterie	0	11	3	ja	westlich
18	Blutenburg	48.15042	11.53805	Privathaushalt	55	97	12	ja	östlich
18	Traverse_Wand	48.15027	11.53648	Traverse der LRS	10	11	3	ja	westlich
19	Tattoo	48.14912	11.53544	Verteilerkasten	82	80	3	ja	westlich
20	LA7	48.14898	11.53648	Baum	3	7,4	3	ja	westlich
21	Gümbelstr_Straße	48.15092	11.53867	Privathaushalt	110	159	9	nein	östlich
21	Laterne_Filteranlage	48.15034	11.53658	Traverse der LRS	3	1,7	3	ja	westlich
22	LA5	48.14936	11.53650	Traverse der LRS	3	7,5	3	ja	westlich
23	Traverse_Straße_unten	48.15028	11.53657	Traverse der LRS	4,4	6,3	1,7	ja	westlich

Tabelle 2: Standorte des low-cost Messnetzes.

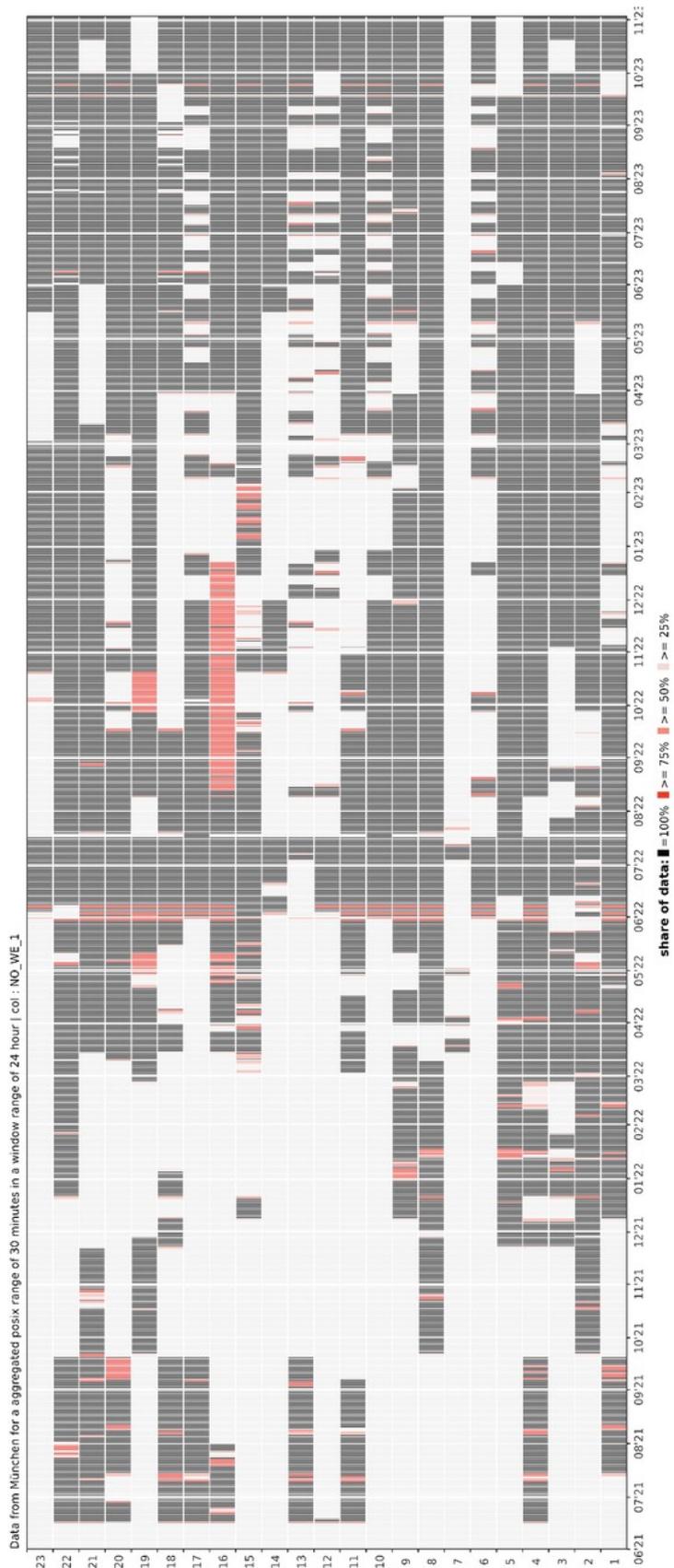


Abbildung 9: Übersicht der Datenverfügbarkeit der Messsysteme des low-cost Messnetzes. Ziffern 1 - 23 verweisen auf die in Tabelle 2 aufgeführten low-cost Messsysteme.

5.3 AP 2: Quantifizierung der synoptischen Rahmenbedingungen

Zur quantitativen Charakterisierung der großräumigen synoptischen Rahmenbedingungen – als relevante Einflussgröße der lokalen lufthygienischen Situation – wurden objektive Wetterlagenklassifikationen erstellt, die jeden Tag des Projektzeitraums einer spezifischen Witterungssituation (Wetterlage) zuordnen. Für die Entwicklung der Wetterlagenklassifikationen wurden verschiedene zugrunde liegende Datensätze sowie unterschiedliche Klassifikationsalgorithmen und Klassifikationsparameter berücksichtigt. Ausgewählte geeignete Wetterlagen gehen in verschiedener Weise in weiterführende Analysen ein. Zum einen werden sie als potenzielle Prädiktoren in statistischen Modellen zur Untersuchung der Abhängigkeiten der raumzeitlichen NO₂-Variabilität von verschiedenen Einflussgrößen berücksichtigt. Zum anderen ermöglichen sie die nach Wetterlagen differenzierte Analyse der Wirksamkeit der Luftreinigungssysteme und darauf aufbauend potenziell die Ableitung von Empfehlungen zum Betrieb der Luftfiltersysteme.

Grundlegende Daten und Vorgehensweisen

Als Datengrundlage zur Bestimmung von Wetterlagen wurden gegitterte atmosphärische Datenfelder aus ERA5-Reanalyse-Modelldaten (Hersbach et al. 2020) herangezogen. Verwendung fanden im Rahmen der Klassifikation hierbei tägliche Datenfelder verschiedener atmosphärischer Variablen (z. B. Mean Sea Level Pressure, Boundary Layer Height), jeweils bezogen auf 12 Uhr UTC. Die räumliche Auflösung der Datenfelder beträgt 0,25° x 0,25°. Die – teils sehr rechenzeitaufwändige – Entwicklung der Klassifikationen und Ermittlung der jeweiligen relevanten Wetterlagen erfolgte jeweils einmalig für den 30-jährigen Bezugszeitraum von 01.01.1992 bis 31.12.2021, um eine möglichst umfassende und repräsentative Datenbasis zu gewährleisten. Die fortlaufend aktualisierte klassifikatorische Zuordnung von Tagen im Projektzeitraum ab 01.01.2022 zu den definierten Wetterlagenklassen wurde im weiteren Verlauf dann aufgrund der in der retrospektiven Analyse ermittelten Zuordnungskriterien durchgeführt. Diese – wenig rechenzeitintensive – Aktualisierung der Wetterlagenklassifikationen erfolgte in Quasi-Echtzeit auf Grundlage der zeitnah (ca. fünf Tage Latenzzeit) verfügbaren Datenfelder des ERA5-Reanalyse-Modells über den gesamten Projektzeitraum bis zum Abschluss der an den Standorten des Messnetzes durchgeführten Messungen Ende September 2023.

Klassifikationsverfahren

Zur Entwicklung objektiver Wetterlagenklassifikationen existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze (z. B. Beck et al. 2007, Huth et al. 2008, Philipp et al. 2007, Philipp et al. 2016).

Im Rahmen des Teilprojekts Messnetz wurde zum einen ein sogenanntes schwellenwertbasiertes Klassifikationsverfahren eingesetzt (Beck et al. 2007, Beck et al. 2014, Beck et al. 2015), bei dem die Einteilung in eine jeweils festgelegte Anzahl von Wetterlagen auf Grundlage der großräumigen Anströmrichtung und der Zyklonalität, jeweils abgeleitet aus großräumigen Feldern des Bodenluftdrucks (Mean Sea Level Pressure - MSLP), erfolgt. Die resultierenden Wetterlagen – als objektive Großwettertypen (GWT) bezeichnet – sind aufgrund ihrer charakteristischen

Anströmrichtungen und zyklonalen/antizyklonalen Prägung einer unmittelbaren synoptisch klimatologischen Interpretation zugänglich.

Zum anderen fand eine clusteranalytische Klassifikationsmethode – nichthierarchische Clusteranalyse mittels k-means Algorithmus (Philipp et al. 2016) – Verwendung. Dieser Klassifikationsansatz erlaubt – über die Berücksichtigung der bodennahen Druckverhältnisse hinaus – auch die zusätzliche Einbindung multipler Klassifikationsvariablen aus verschiedenen atmosphärischen Höhengniveaus.

Die Erstellung der verschiedenen Wetterlagenklassifikationen erfolgte mittels der maßgeblich am Lehrstuhl für Physische Geographie mit Schwerpunkt Klimaforschung entwickelten cost733class Software (Philipp et al. 2010, Philipp et al. 2016) auf dem Augsburger Linux Compute Cluster (ALCC).

Klassifikationsparameter

Neben dem Einsatz zweier verschiedener Klassifikationsverfahren wurden Variationen verschiedener Parameter der Wetterlagenklassifikationen getestet, um eine möglichst gute Trennschärfe bezüglich der lufthygienischen Situation am Untersuchungsstandort Landshuter Allee zu erreichen. Insbesondere beinhaltete dies drei unterschiedlich große räumliche Ausschnitte, die zur Klassifikation herangezogen wurden (11°W – 33°O, 32°N – 64°N; 5°W – 25°O, 35°N – 61°N; 0°O – 20°O, 41°N – 55°N), unterschiedliche Klassenanzahlen (10, 18, 27 Klassen) und ganzjährige sowie jahreszeiteinspezifische Klassifikationen.

Klassifikationsergebnisse

Aus den Wetterlagenklassifikationen resultieren zum einen die sogenannten Wetterlagenkataloge, die für jeden Tag im betrachteten Zeitraum die eindeutige Zuordnung zu einer spezifischen Wetterlage enthalten (vgl. Abbildung 11). Zum anderen wird für jede Wetterlage ein charakteristisches Muster berechnet, das die mittlere räumliche Verteilung der klassifizierten Variablen für die jeweilige Wetterlage repräsentiert (vgl. Abbildung 10).

Beispielhaft zeigt die Abbildung 10 die mittleren Bodenluftdruckmuster für die 18 Klassen/Wetterlagen einer objektiven Großwettertypenklassifikation (GWT), angewendet auf tägliche Bodenluftdruckfelder für den Ausschnitt 11°W – 33°O, 32°N – 64°N im Zeitraum 01.01.1992 – 31.12.2021. Die Wetterlagen-Muster zeigen jeweils klar differenzierte Bodenluftdruck-/Strömungskonfigurationen über dem europäischen Bereich. Im Einzelnen sind dies:

- die zonal geprägte Wetterlage W,
- die primär meridional bestimmten Wetterlagen N, NE, E, SE und S sowie
- die gemischtem Wetterlagen SW, NW, T und H – mit zonalen und meridionalen Strömungsanteilen.

Mit Blick auf die lokalen meteorologischen und lufthygienischen Verhältnisse am Untersuchungsstandort Landshuter Allee sind neben den typspezifisch offensichtlichen großräumigen Anströmrichtungen insbesondere die variierend zyklonalen (z)/ antizyklonalen (az) Ausprägungen der Subtypen – und der Wetterlagen T und H – bedeutsam, die lufthygienisch relevanten intensivierten/reduzierten atmosphärischen Austausch implizieren.

Großwettertypen basierend auf Bodenluftdruckfeldern

Klassifikationszeitraum: 1992-01-01 – 2021-12-31; Ausschnitt: 11°W – 33°O, 32°N – 64°N

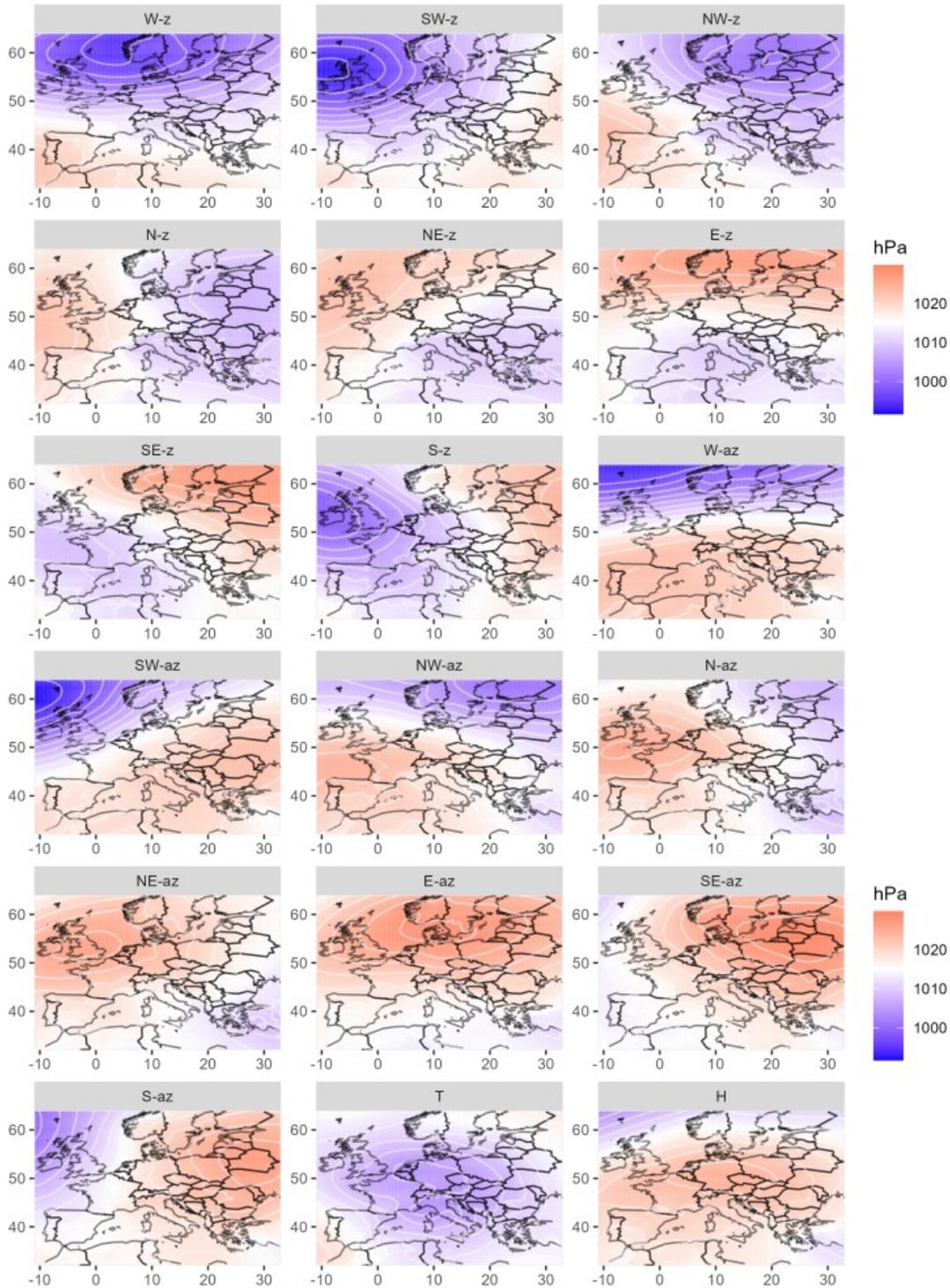


Abbildung 10: Mittlere Bodenluftdruckmuster (MSLP in hPa) für 18 Wetterlagen der objektiven Großwettertypenklassifikation, basierend auf Bodenluftdruckfeldern für den Ausschnitt 11°W – 33°O, 32°N – 64°N, klassifiziert mit dem GWT-Algorithmus. Die Wetterlagen können jeweils einer der acht großräumigen Hauptwindrichtungen (W, SW, NW, N, NE, E, SE, S) oder einer zentralen Tiefdruck- (T) bzw Hochdrucksituation (H) zugeordnet werden. Für die acht richtungsbestimmten Wetterlagen ergibt sich eine weitere Differenzierung in jeweils einen zyklonal (z) sowie einen antizyklonal (az) bestimmten Subtypen.

YYYY-MM-DD	GWT
2023-01-19	W-z
2023-01-20	NE-z
2023-01-21	NE-z
2023-01-22	E-z
2023-01-23	E-az
2023-01-24	E-az
2023-01-25	H
2023-01-26	NE-z
2023-01-27	NE-az
2023-01-28	NE-az
2023-01-29	H
2023-01-30	NW-az
2023-01-31	NW-az
2023-02-01	NW-az
2023-02-02	NW-az
2023-02-03	NW-z
2023-02-04	NE-az
2023-02-05	NE-az
2023-02-06	E-az
2023-02-07	SE-az
2023-02-08	H
2023-02-09	H

Abbildung 11: Wetterlagenkatalog (Ausschnitt für 19.01.2023 bis 09.02.2023) der 18 Wetterlagen umfassenden objektiven Großwettertypenklassifikation, basierend auf Bodenluftdruckfeldern für den Ausschnitt 11°W - 33°O, 32°N - 64°N, klassifiziert mit dem GWT-Algorithmus (siehe dazugehörige MSLP-Muster in Abbildung 10). Datum in Spalte 1, objektiv ermittelte Wetterlage (GWT) in Spalte 2.

Ein willkürlich gewählter Ausschnitt (19.01.2023 bis 09.02.2023) aus dem dazugehörigen Wetterlagenkatalog ist beispielhaft in Abbildung 11 dargestellt.

Abbildung 12 zeigt die relativen Auftrittshäufigkeiten der 18 objektiven Großwettertypen für den 30-jährigen Zeitraum von 1992 bis 2021 und für den Projektzeitraum von Oktober 2020 bis September 2023. Zwischen den beiden Häufigkeitsverteilungen besteht mehrheitlich Übereinstimmung. Lediglich für den Großwettertypen Ost-antizyklonal (E-az) zeigen sich mit gesteigerten Häufigkeitsanteilen im Projektzeitraum etwas deutlichere Abweichungen. Insgesamt repräsentieren die Zirkulationsverhältnisse während des Projektzeitraums aber weitgehend "normale" Bedingungen.

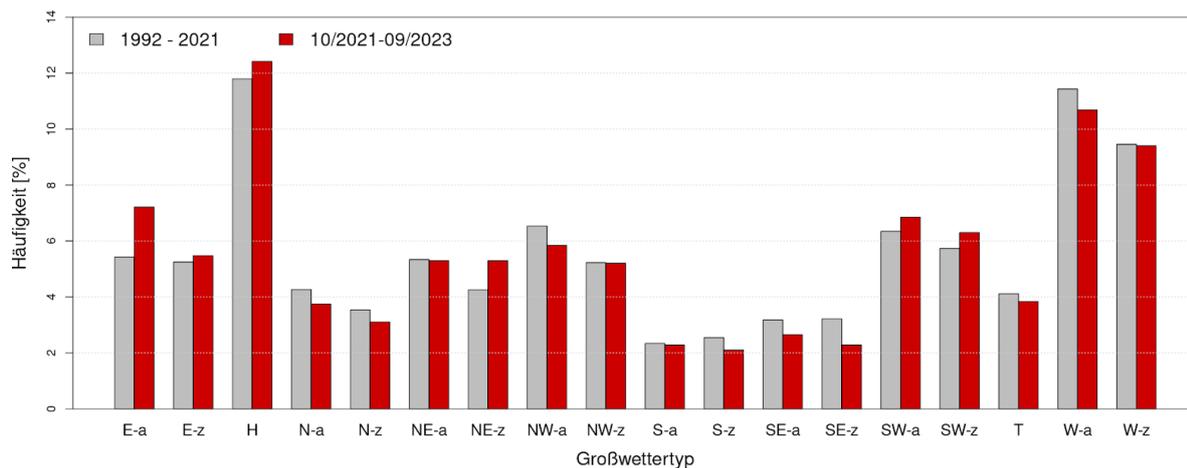


Abbildung 12: Relative Auftrittshäufigkeiten der 18 Großwettertypen aus der Großwettertypenklassifikation, basierend auf Bodenluftdruckfeldern für den Ausschnitt 11°W - 33°O, 32°N - 64°N. Für den Zeitraum 1992-2021 und für den Projektzeitraum 10/2021 - 09/2023.

5.4 AP 3: Statistische Modellierung der raumzeitlichen NO₂-Verteilung

AP 3 beinhaltet als grundlegenden Schritt der Datenanalyse zunächst die Abschätzung von NO₂-Konzentrationswerten aus den low-cost Messwerten - die sogenannte Kalibrierung - mittels statistischer Transferfunktionen, die als abschließenden Schritt auch eine Driftkorrektur der modellierten Werte einschloss. Auf der Grundlage der modellierten NO₂-Werte folgten weiterführende statistische Analysen zur raumzeitlichen Variabilität der NO₂-Konzentrationen, inklusive Wirksamkeitsabschätzung der Luftreinigungssysteme.

Kalibrierung und Kreuzvalidierung

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden verschiedene Ansätze zur Kalibrierung der low-cost Messwerte erarbeitet und bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit verglichen. Für eine Optimierung der Kalibrierung wurden davor zum einen Ausreißer eliminiert, die über dem 98%- oder unter dem 2%-Perzentil der Messdaten lagen. Zum anderen wurde ein Prädiktorenscreening durchgeführt, um die Wichtigkeit der einzelnen Prädiktoren zu prüfen und deren Anzahl ggf. anzupassen. Eine geringere Anzahl an Prädiktoren trägt bei sonst gleichen Kalibrierungsbedingungen zu einer besseren Übersicht und ggf. Modellgüte bei. Abbildung 13 zeigt die Wichtigkeit (Importance) der einzelnen Prädiktoren für ein ausgewähltes Modell für alle Messboxen, welches

repräsentativ für alle Modelle ist. Vier Prädiktoren zeigen eine Importance von nahe 0, weshalb diese bei den folgenden Kalibrierungen nicht berücksichtigt wurden.

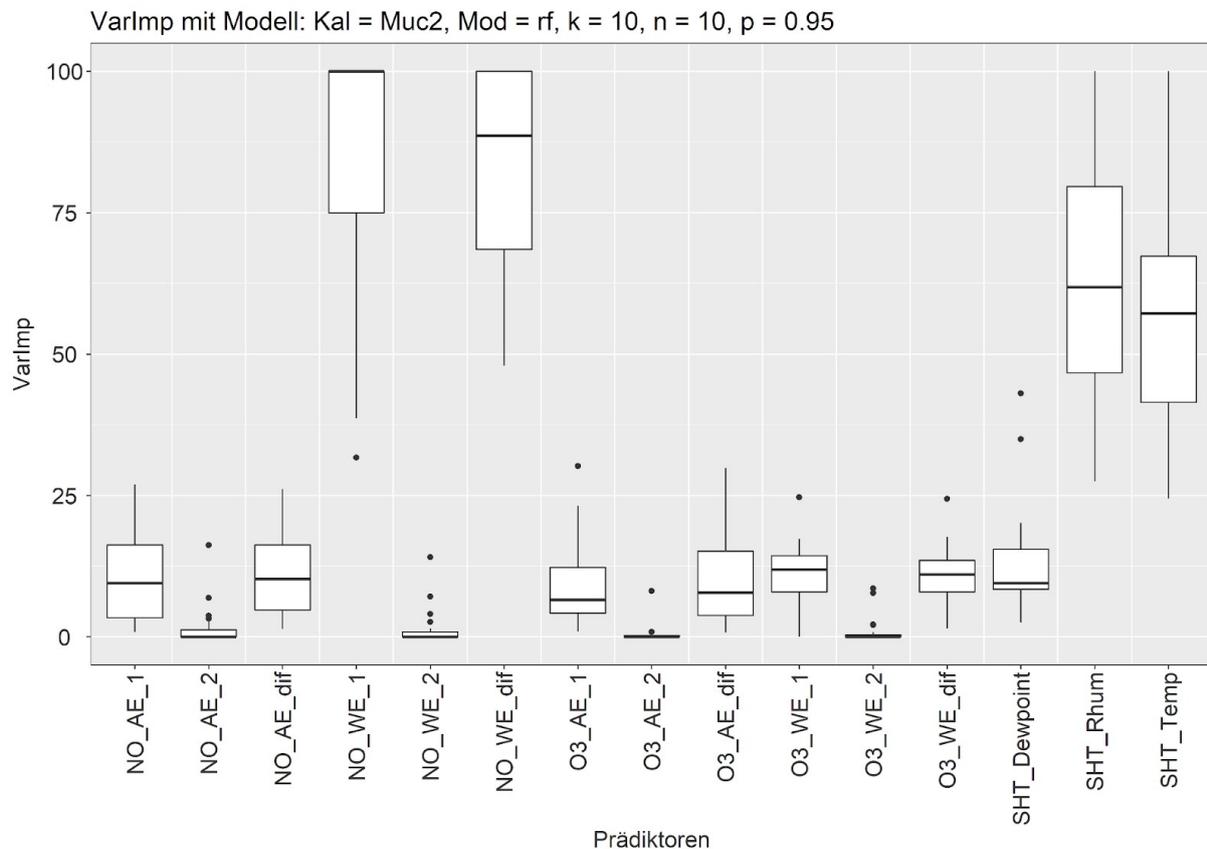


Abbildung 13: Wichtigkeit/Importance der einzelnen Prädiktoren für ein ausgewähltes Modell (Random Forest, Kalibrierungsperiode 2).

Die Kalibrierungen wurden mit den daraus resultierenden Messwerten, die zunächst intern auf 1-Minuten-Werte und anschließend auf 1-Stunden-Werte aggregiert wurden, durchgeführt. Als Referenz dienten die Messwerte der LÜB Station „Landshuter Allee“ des LfU. Es wurden ergänzend zur linearen/schrittweisen multiplen Regression auch fortgeschrittene nichtlineare Ansätze des Maschinellen Lernens wie Random Forest, Ranger Random Forest, Gradient Boosting sowie Radial Support Vector Machine eingesetzt (Bigi et al. 2018). Innerhalb der verschiedenen Modelle wurden verschiedene Parameter systematisch variiert, um mittels diesem Hyperparameter tuning die einzelnen Modelle zu optimieren. Die verschiedenen Modelle wurden auf die Messboxdaten angewendet, mittels Kreuzvalidierungsansätzen evaluiert und bezüglich ihrer Performance verglichen. Bei der Kreuzvalidierung wurde jeder Datensatz in einen Trainings- (95%) und Testdatensatz (5%) aufgeteilt, wobei jeder Trainingsdatensatz zusätzlich noch in k-folds unterteilt wurde. Mit jedem fold wird ein eigenständiges Modell errechnet und die Auswahl des finalen Modells erfolgt anhand des niedrigsten RMSE (Root Mean Square Error) Wertes. Anschließend wurden für das finale Modell mit dem Testdatensatz die Metriken/Performance berechnet.

Die Modelle wurden für alle drei Kalibrierungsperioden berechnet, welche in folgenden Zeiträumen stattfanden: K1 16.06.2021 bis 21.09.2021, K2 30.05.2022 bis 18.07.2022, K3 18.09.2023 bis 02.11.2023. Die Validierungsergebnisse der

verschiedenen Modellansätze sowie aller Kalibrierungsperioden für alle Messboxen können in den Abbildungen 14 und 15 betrachtet werden.

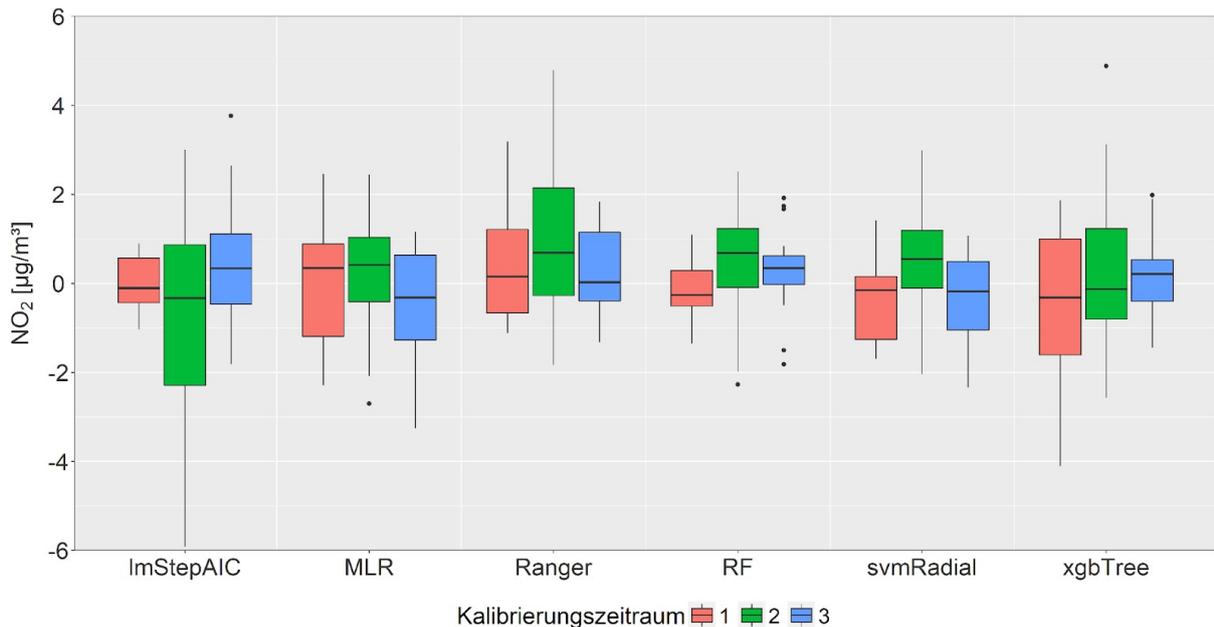


Abbildung 14: Bias als Maß für die Modellgüte (ermittelt für unabhängige Validierungstestdatensätze) basierend auf allen Kalibrierungsmodellen für alle Kalibrierungszeiträume sowie allen Messboxen. lmStepAIC = schrittweise multiple Regression, MLR = lineare multiple Regression, Ranger = Ranger Random Forest, RF = Random Forest, svmRadial = Radial Support Vector Machine, xgbTree = Gradient Boosting.

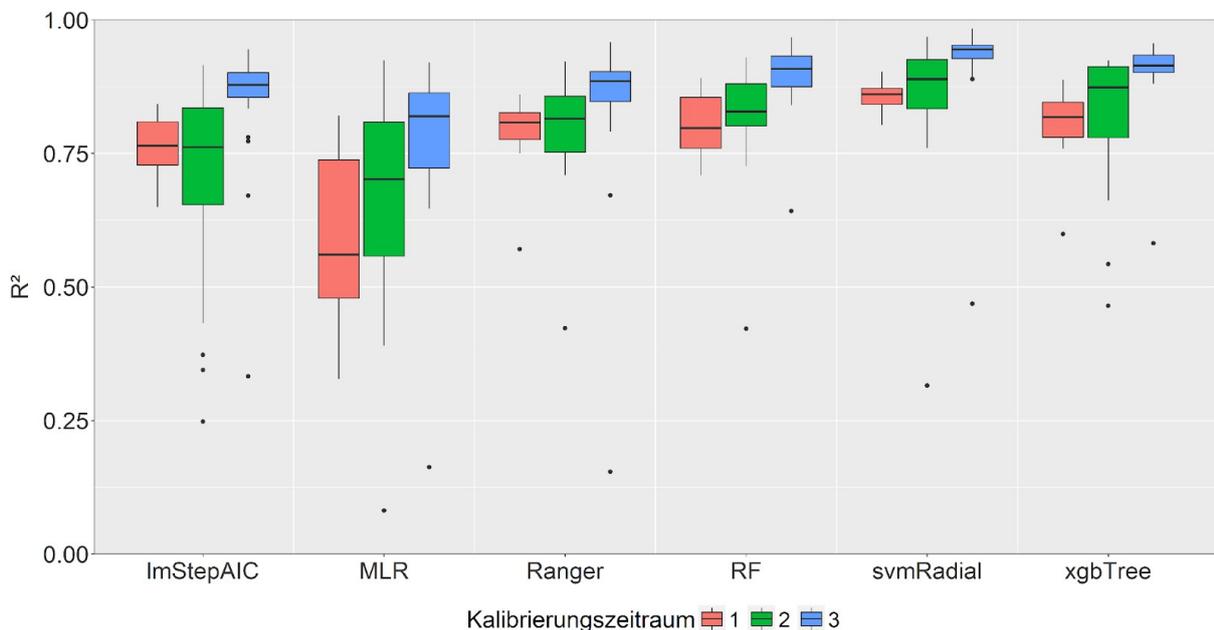


Abbildung 15: Bestimmtheitsmaß (R^2) als Maß für die Modellgüte (ermittelt für unabhängige Validierungstestdatensätze) basierend auf allen Kalibrierungsmodellen für alle Kalibrierungszeiträume sowie allen Messboxen. lmStepAIC = schrittweise multiple Regression, MLR = lineare multiple Regression, Ranger = Ranger Random Forest, RF = Random Forest, svmRadial = Radial Support Vector Machine, xgbTree = Gradient Boosting.

Zur Beurteilung der Modellgüte wurden verschiedene Gütemaße herangezogen, von denen zwei - Bias und Bestimmtheitsmaß (R^2) - in den Abbildungen 14 und 15

aufgeführt sind. Generell ist die Modellgüte - im Sinne der erklärten Varianz - mit einem Median des Bestimmtheitsmaßes von nahe 0,9 sehr hoch. Lediglich die linearen Modelle zeigen teilweise deutlich schlechtere Werte, was allerdings durch ihren linearen Ansatz erklärt werden kann. Der Bias liefert mit einem Median von ungefähr 0 und vorwiegend Werten unter $\pm 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ebenfalls gute Ergebnisse.

Einige Messboxen führen zu negativ abweichenden Modellgütemaßen, da für diese Messboxen nur sehr eingeschränkt Messdaten während der Kalibrierungsperioden zur Verfügung standen (siehe Kapitel 5.2). Random Forest liefert sowohl beim Bestimmtheitsmaß als auch beim Bias sowie den - hier nicht gezeigten - anderen zusätzlichen berechneten Gütemaßen insgesamt die besten Werte, weshalb bei den Analysen der Fokus auf diesen Modellansatz gelegt wurde.

Driftkorrektur

Fast alle elektrochemischen Zellen, die in low-cost Sensoren verbaut sind, sind anfällig für Sensitivitätsverluste aufgrund ihrer Alterung mit der Zeit und zeigen deshalb einen gewissen Grad an Drift der aufgezeichneten Daten (Mijling et al. 2018, van Zoest et al. 2019). Abbildung 16 zeigt die Differenzen der NO_2 -Stundenwerte des LfU zu den modellierten NO_2 -Stundenwerte der einzelnen Messboxen für jeden der drei Kalibrierungszeiträume. Dabei wurden die Differenzen zusätzlich aufgeteilt nach dem Kalibrierungszeitraum, auf dem die jeweilige Modellierung basiert.

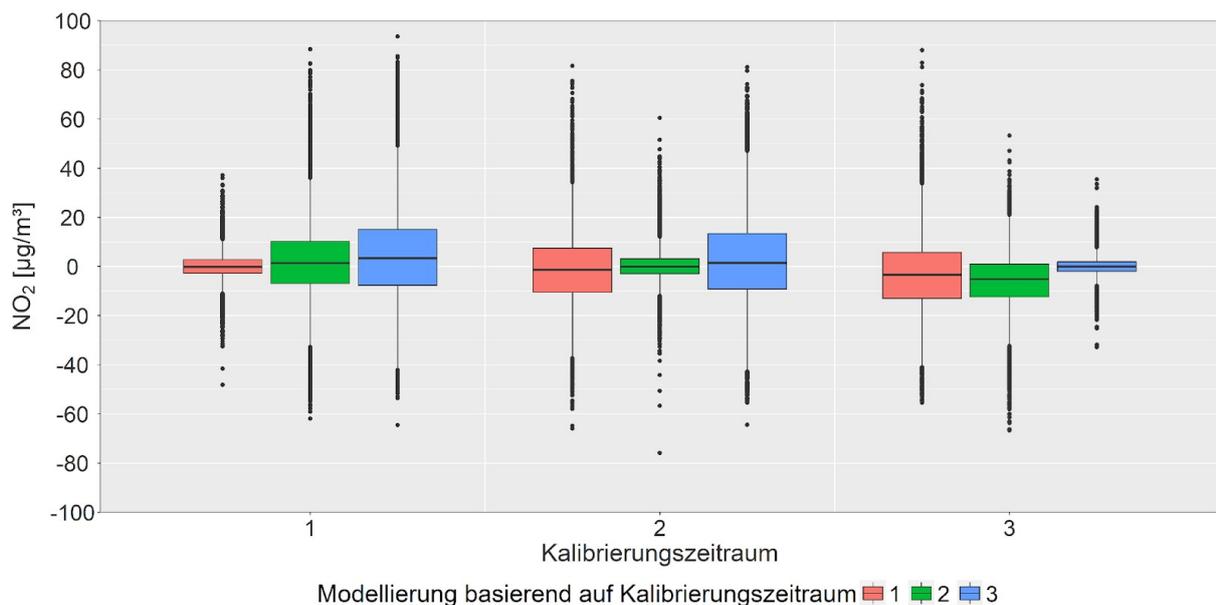


Abbildung 16: Differenzen der NO_2 -Stundenwerte des LfU zu den modellierten NO_2 -Stundenwerte der einzelnen Messboxen für jeden der drei Kalibrierungszeiträume mit zusätzlicher Aufteilung des Kalibrierungszeitraumes auf dem die jeweilige Modellierung basiert.

Aus Abbildung 16 ist deutlich ersichtlich, dass die modellierten NO_2 -Stundenwerte die geringsten Differenzen und damit die besten Annäherungen an die LfU-Werte zeigen, die jeweils in den Kalibrierungszeitraum modelliert wurden. So weisen beispielsweise für den ersten Kalibrierungszeitraum die Modellierungen die geringsten NO_2 -Differenzen auf, welche auch mit dem ersten Kalibrierungszeitraum kalibriert wurden. Je weiter der jeweilige Kalibrierungszeitraum entfernt ist, auf dem die Modellierung basiert, desto höher fallen die Differenzen aus.

Um eine Verschlechterung der Messdaten durch die Drift zu reduzieren, wurde eine Driftkorrektur vorgenommen. Die Korrektur beruht auf dem Verfahren von Mijling et al. (2018), welche die korrigierten Daten mittels eines gewichteten Durchschnitts berechnet haben. Hierbei werden allen Messzeitpunkten zwischen zwei Kalibrierungszeiträumen zunächst ein Gewicht zugeordnet. Je näher der Messzeitpunkt an einem Kalibrierungszeitraum liegt, desto größer ist das Gewicht für den Messwert dieses Messzeitpunktes, dessen Modellierung auf diesen Kalibrierungszeitraum basiert. Anschließend wird für jeden Messzeitpunkt das dazugehörige Gewicht mit den beiden NO_2 -Messwerten (ein Wert für die Modellierung, welche auf dem ersten Kalibrierungszeitraum basiert, sowie ein Wert für die Modellierung, welche auf dem zweiten Kalibrierungszeitraum basiert) verrechnet, sodass ein gewichteter Durchschnitt der beiden Messwerte entsteht. In den Abbildungen 17 und 18 sind die Zeitreihen der modellierten NO_2 -Tagesmittel sowie die driftkorrigierten NO_2 -Tagesmittel für die zwei ausgewählten Standorte Muc_LA4 und Muc_LA5 über den kompletten Messzeitraum dargestellt. Die modellierten NO_2 -Tagesmittel basierend auf den einzelnen Kalibrierungszeiträumen sowie die driftkorrigierten NO_2 -Werte sind jeweils unterschiedlich eingefärbt. Die zwei Standorte wurden ausgewählt, da sie lediglich ein paar Meter südlich bzw. nördlich der LÜB-Station lagen und für alle drei Kalibrierungszeiträume Daten aufweisen.

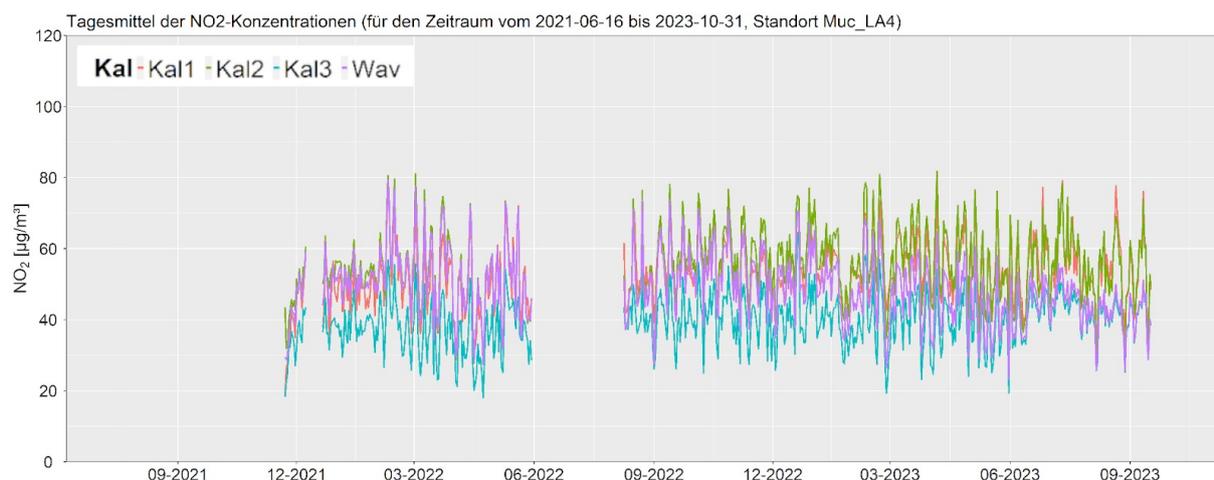


Abbildung 17: Zeitreihe der modellierten NO_2 -Tagesmittel sowie die driftkorrigierten NO_2 -Tagesmittel für den Standort Muc_LA4 über den kompletten Messzeitraum. Die modellierten NO_2 -Tagesmittel, basierend auf den einzelnen Kalibrierungszeiträumen (Kal1, Kal2 & Kal3), sowie die driftkorrigierten NO_2 -Werte (Wav) sind jeweils unterschiedlich eingefärbt.

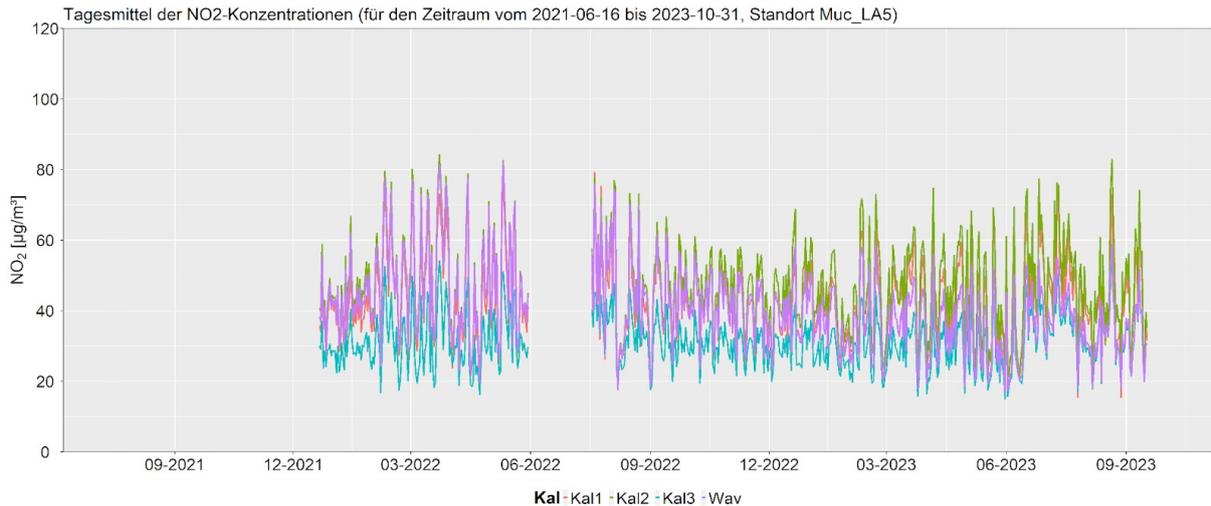


Abbildung 18: Zeitreihe der modellierten NO_2 -Tagesmittel sowie die driftkorrigierten NO_2 -Tagesmittel für den Standort Muc_LA5 über den kompletten Messzeitraum. Die modellierten NO_2 -Tagesmittel, basierend auf den einzelnen Kalibrierungszeiträumen (Kal1, Kal2 & Kal3), sowie die driftkorrigierten NO_2 -Werte (Wav) sind jeweils unterschiedlich eingefärbt.

Abbildungen 19 und 20 zeigen die Zeitreihen der Differenzen der modellierten NO_2 -Tagesmittel des LfU zu den modellierten und driftkorrigierten NO_2 -Tagesmittel derselben ausgewählten Standorte wie oben (Muc_LA4 und Muc_LA5) über den kompletten Messzeitraum. Die modellierten NO_2 -Tagesmittel basierend auf den einzelnen Kalibrierungszeiträumen sowie die driftkorrigierten NO_2 -Werte sind ebenfalls jeweils unterschiedlich eingefärbt.

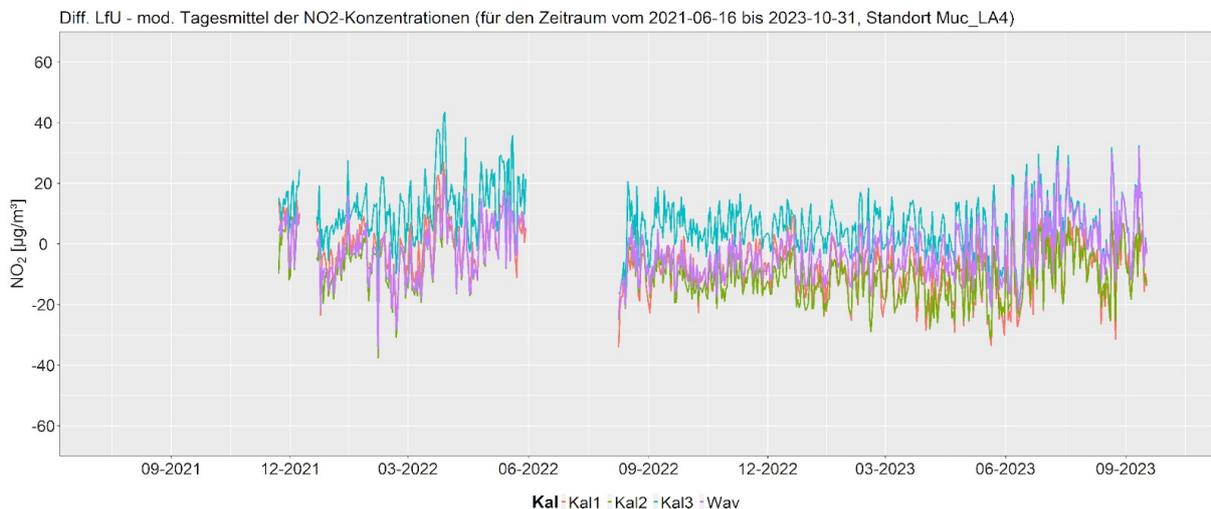


Abbildung 19: Zeitreihe der Differenzen der modellierten NO_2 -Tagesmittel des LfU zu den modellierten sowie driftkorrigierten NO_2 -Tagesmittel für den Standort Muc_LA4 über den kompletten Messzeitraum. Die modellierten NO_2 -Tagesmittel, basierend auf den einzelnen Kalibrierungszeiträumen (Kal1, Kal2 & Kal3), sowie die driftkorrigierten NO_2 -Werte (Wav) sind jeweils unterschiedlich eingefärbt.

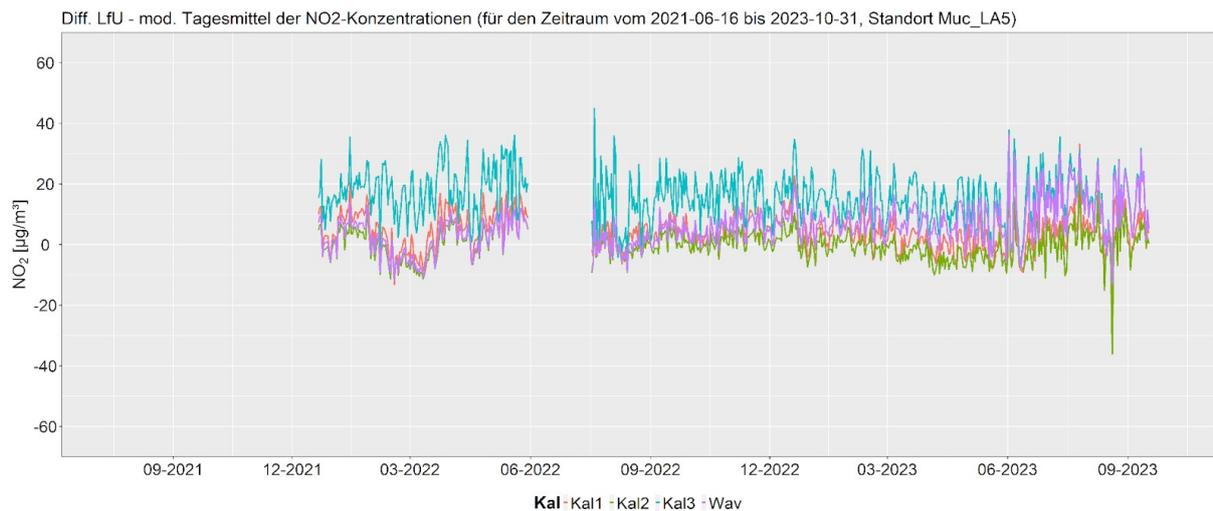


Abbildung 20: Zeitreihe der Differenzen der modellierten NO₂-Tagesmittel des LfU zu den modellierten sowie driftkorrigierten NO₂-Tagesmittel für den Standort Muc_LA4 über den kompletten Messzeitraum. Die modellierten NO₂-Tagesmittel, basierend auf den einzelnen Kalibrierungszeiträumen (Kal1, Kal2 & Kal3), sowie die driftkorrigierten NO₂-Werte (Wav) sind jeweils unterschiedlich eingefärbt.

Die Plausibilität der kalibrierten Daten der Messboxen wurde zusätzlich durch Vergleich mit Passivsammlerdaten des LfU überprüft. Diese Daten stammen von verschiedenen Passivsammlern, welche entlang der Landshuter Allee angebracht waren, und Monatsmittelwerte der NO₂-Konzentrationen über die letzten drei Jahre aufgezeichnet hatten. Ein Vergleich der Passivsammlerdaten mit den modellierten Werten einer ausgewählten Messbox für den ausgewählten Standort an der LÜB-Station von Juni 2021 bis September 2023 zeigt Abbildung 21. Drei der Passivsammler (ML1_Lueb, ML2_Lueb und ML3_Lueb) und die Messbox (Muc_Lueb) befanden sich direkt auf der LÜB-Station, ein weiterer Passivsammler (ML5_Lueb_s) wenige Meter südlich der LÜB-Station. Die modellierten NO₂-Monatsmittel basieren auf dem zweiten Kalibrierungszeitraum, da für diese Messbox keine driftkorrigierten Daten erstellt werden konnten. Die Monatsmittel der Passivsammler zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf wie die Messbox sowie die LÜB-Station. Zwar weichen einige Werte der Messbox von denen der LÜB-Station ab, da sie teilweise überschätzt wurden, wobei dies auch auf einige Werte der Passivsammler zutrifft und zusätzlich ML5_Lueb_s sogar oftmals die Werte deutlich unterschätzt. Trotzdem ist insgesamt der Vergleich der kalibrierten Daten mit den Passivsammlern neben der Performance und Modellgüte eine weitere Bestätigung für die Ergebnisse der durchgeführten Kalibrierung und Kreuzvalidierung der Daten.

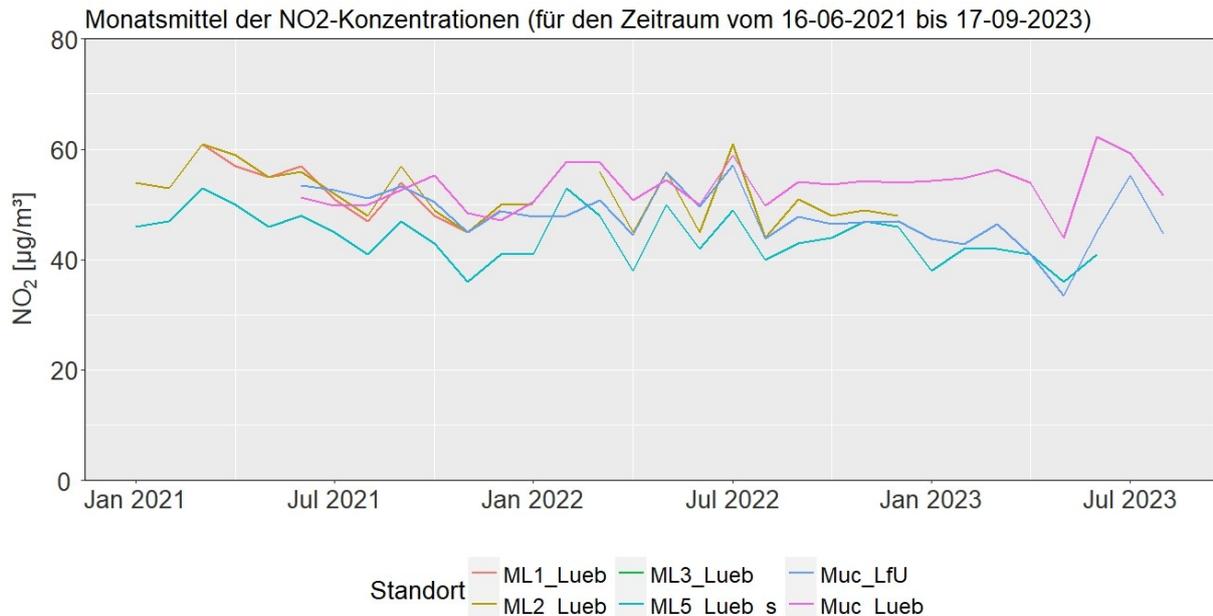


Abbildung 21: Zeitreihe der modellierten NO₂-Monatsmittel für die Messbox Muc_Lueb und für vier Passivsammler (ML1_Lueb, ML2_Lueb, ML3_Lueb, ML5_Lueb_s) sowie Referenzwerte der LÜB-Station Landshuter Allee für den Zeitraum vom 16.06.2021 bis 17.09.2023. Die modellierten NO₂-Monatsmittel basieren auf dem zweiten Kalibrierungszeitraum.

Statistische Modelle zur Analyse raumzeitlicher NO₂-Variabilität

Auf der Grundlage der für die Messstandorte des low-cost Messnetzes modellierten NO₂-Konzentrationswerte wurden statistische Modelle angepasst, mit dem Ziel die raumzeitliche Variabilität der NO₂-Konzentrationen am Untersuchungsstandort hinsichtlich ihrer relevanten Einflussgrößen quantitativ zu charakterisieren. Um hierbei auch nichtlineare Zusammenhänge und Prädiktoren mit unterschiedlichen Skalenniveaus adäquat berücksichtigen zu können, wurde mit Random Forest Regressionen ein Ansatz des Maschinellen Lernens eingesetzt (Breiman 2001).

Die in den Modellen berücksichtigten Prädiktoren beinhalteten zum einen dynamische (zeitlich variable) Größen und zum anderen statische (zeitlich invariante) Größen (siehe Tabelle 3).

Random Forest Modelle wurden für unterschiedliche Prädiktorkombinationen erstellt. Die Güte der Modelle (Erklärte Varianz) wurde mittels des quadrierten Korrelationskoeffizienten (R^2) zwischen modellierten und Prädiktandenwerten quantifiziert und die Bedeutsamkeit der Prädiktorvariablen in den Modellen in Form der „Permutation Importance“ ermittelt.

Tabelle 3: Prädiktoren in statistischen Modellen raumzeitlicher NO₂-Variabilität. Verwendete Variablenamen in kursiv und klein.

Dynamische Prädiktoren	Statische Prädiktoren
Lokale Meteorologie <ul style="list-style-type: none"> • Lufttemperatur (°C) <i>DWD_TT_TU</i> • U- und V-Komponente des Windes (m/s) <i>U_wnd, V_wnd</i> • Windgeschwindigkeit (m/s) <i>DWD_F</i> • Niederschlag (mm) <i>DWD_R1</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Entfernung zur Landshuter Allee (m) <i>Entfernung</i> • Geographische Position (°Longitude und °Latitude) <i>Lon, Lat</i> • Höhe über Grund (m) • Sichtlinie zur Landshuter Allee (ja/nein) <i>Sichtlinie</i> • Ausrichtung zur Landshuter Allee (W/O) <i>Ausrichtung</i>
Großräumige synoptische Bedingungen <ul style="list-style-type: none"> • Großwettertypen (18 Typen) <i>Wetterklasse</i> 	
Emissionssituation <ul style="list-style-type: none"> • NO₂-Emissionsschätzungen des TP Verkehr (g/h); verfügbar bis Mai 2023 <i>w4</i> 	
Datum und Uhrzeit <ul style="list-style-type: none"> • Wochentag (1 – 7) <i>wd</i> • Uhrzeit (0 – 23) <i>hour</i> 	

6 Zusammenstellung der Gesamtproblematik und bisher bekannt gewordener Ergebnisse auf dem Gebiet der Aufgabenstellung

Die dem Verbundprojekt „Reinigen neue Luftfiltersysteme von urbanem Stickstoffdioxid?“ zugrundeliegende Problematik besteht darin, dass Stickstoffdioxid (NO₂) in der bodennahen Atmosphäre eine nachgewiesenermaßen nachteilige Gesundheitswirkung entfalten kann und hohe potentiell gesundheitsrelevante NO₂-Konzentrationen insbesondere in urbanen Bereichen mit hohen primär verkehrsbedingten Emissionen auftreten (z. B. Costa et al. 2014).

An den Messstationen der amtlichen Messnetze (in Bayern das Lufthygienische Landesüberwachungssystem Bayern (LÜB)) werden die lokalen Immissionsbelastungen kontinuierlich erfasst, um insbesondere Überschreitungen festgelegter Grenzwerte (40 µg/m³ Jahresmittel; Stundenmittel 200 µg/m³ nicht öfter als 18 mal im Kalenderjahr; laut EU-Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG und der nationalen Umsetzung in der 39. Bundes-Immissionsschutzverordnung) zu detektieren.

Allerdings bilden die Messungen, die im Rahmen der amtlichen Messnetze an Einzelstandorten durchgeführt werden, die raumzeitliche Variabilität der NO₂-Konzentrationen innerhalb komplexer urbaner Strukturen nicht adäquat ab. Ergänzend zu den amtlichen qualitätsgesicherten NO₂-Messungen können kostengünstige Messsysteme, sogenannte low-cost Sensoren, die z. B. auf elektrochemischen Messverfahren beruhen, eingesetzt werden, um eine räumliche Ausweitung und Verdichtung der NO₂-Konzentrationsmessungen zu realisieren. Die

grundsätzliche Eignung entsprechender Sensoren zur quantitativen Einschätzung der Luftqualität in raumzeitlicher Differenzierung, aber auch deren sensorspezifische Einschränkungen und sich daraus ergebende Erfordernisse wurden in verschiedenen Studien dokumentiert (z. B. Bigi et al. 2018, Kang et al. 2022).

Wesentliche Einflussgrößen der genannten ausgeprägten raumzeitlichen Variabilität der NO₂-Konzentrationen in urbanen Umgebungen sind neben den Emissionsquellen auch standortspezifisch variierende Umgebungscharakteristika (z. B. Entfernung zu Emissionsquellen), aber auch die lokalen meteorologischen (z. B. Lufttemperatur, Wind) und die großräumigen synoptischen (z. B. austauscharme Wetterlagen) Rahmenbedingungen. Zur Quantifizierung der großräumigen atmosphärischen Bedingungen als maßgeblicher Treiber der lokal modifiziert wirksam werdenden lufthygienisch relevanten meteorologischen Einflussgrößen eignen sich in besonderem Maße sogenannte Wetterlagenklassifikationen. In verschiedenen Studien zu Zusammenhängen zwischen Wetterlagen und regionaler/lokaler Luftqualität fanden insbesondere solche Ansätze zur Wetterlagenklassifikation Anwendung, die eine Kategorisierung der großräumigen atmosphärischen Felder unter Berücksichtigung unterschiedlicher großräumiger Anströmrichtungen und variabler Ausprägungen der Zyklonalität herbeiführen (z. B. Russo et al 2014, Grundström et al. 2015, Pope et al. 2015).

Eine neuartige Möglichkeit zur Verbesserung der urbanen Luftqualität in hochbelasteten urbanen Umgebungen wie im Umfeld der Landshuter Allee in München besteht in der Entfernung von NO₂ aus der bodennahen Umgebungsluft mittels aktiver Filtersysteme, die im Rahmen des Forschungsprojekts entlang der Landshuter Allee installiert und betrieben wurden. Zur Wirksamkeitseinschätzung entsprechender Anlagen liegen bisher im Wesentlichen nur Ergebnisse aus simulationsgestützten Abschätzungen vor. Systematische Untersuchungen zur raumzeitlich differenzierten Wirksamkeit der Systeme unter Realbedingungen, wie sie Gegenstand des Projektes „Reinigen neue Luftfiltersysteme von urbanem Stickstoffdioxid?“ sind, wurden bisher nicht durchgeführt.

7 Angewandte wissenschaftliche und technische Methoden

7.1 Technische Methoden

Im Teilprojekt Messnetz kamen verschiedene low-cost Sensoren, zur Erfassung gasförmiger Bestandteile (NO₂, O_x) in der Umgebungsluft, sowie wichtiger meteorologischer Messgrößen (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit) zum Einsatz. Zum Betrieb der luftchemischen und meteorologischen Sensorik sowie der Messdatenaggregation und der Datenübertragung wurden auf Raspberry Pi Zero W basierende Controller konfiguriert (siehe detaillierte Erläuterungen hierzu in Kap. 5.2).

Zur Messdatenerfassung, initialen Datenaggregation, -aufbereitung und -übertragung sowie zur allgemeinen Betriebssteuerung der Low-Cost-Messsysteme wurden Python- und Unix-Shell-Skripte entwickelt und eingesetzt.

Die verschiedenen Schritte der Datenanalyse und Modellierung wurden unter Verwendung der freien Softwareumgebung R (R Core Team 2021) durchgeführt.

7.2 Wissenschaftliche Methoden

Die im Teilprojekt Messnetz angewandten wissenschaftlichen Methoden beinhalten neben der initialen und projektbegleitenden Literaturrecherche (siehe Kap. 3) vor allem unterschiedliche Ansätze der multivariaten statistischen Analyse und Modellierung, die in verschiedenen Arbeitspaketen Anwendung fanden:

Schwellenwertbasierte und auf statistische Optimierungsverfahren (nichthierarchische Clusteranalyse) beruhende multivariate Klassifikationen zur Charakterisierung der synoptischen Rahmenbedingungen mittels Bestimmung relevanter Wetterlagen (siehe Kap. 5.3).

Lineare und nichtlineare statistische Modelle (inklusive Ansätzen des Maschinellen Lernens) zur Abschätzung der NO₂-Konzentrationswerte aus Low-Cost Messwerten und zur Analyse der raumzeitlichen Variabilität der NO₂-Konzentration im Untersuchungsgebiet (siehe Kap. 5.4).

8 Während der Durchführung des Teilprojekts 4 der Universität bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Für die im Teilprojekt Messnetz durchgeführten Arbeiten relevante Erkenntnisfortschritte ergaben sich während der Projektlaufzeit vor allem im Bereich der Abschätzung von Luftqualitätsparametern auf der Basis von Messungen mit Low-Cost Sensoren. Dies beinhaltet zum einen publizierte Arbeiten zu Entwicklung, Anwendung und Evaluierung statistischer Ansätze zur Modellierung von NO₂-Konzentrationswerten aus low-cost Messungen, die bei der Konzeption und Umsetzung entsprechender Modelle im Rahmen des Projekts Berücksichtigung fanden (z. B. Bisignano et al. 2022, Concas et al. 2021, Kang et al. 2022). Zum anderen ergaben sich vor allem durch direkte Kontakte und wissenschaftlichen Austausch mit beteiligten WissenschaftlerInnen anderer Projekte/Forschungsinitiativen zu low-cost basierten Luftqualitätsanalysen wichtige Hinweise mit Blick auf die initiale Konfiguration und fortlaufende Anpassung und Optimierung der im Projekt konzipierten und eingesetzten low-cost NO₂-Messsysteme. Dies beinhaltete sowohl hardwareseitige Belange wie die Realisierung der Stromversorgung der Messsysteme als auch softwareseitige Aspekte wie die Sensorprogrammierung oder die Messdatenerfassung und -aggregation. Insbesondere zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang der Austausch mit Beteiligten des Smart Air Quality Network (z. B. Budde et al. 2017).

9 Darstellung und Bewertung der erzielten Ergebnisse und ihrer praktischen Anwendbarkeit

Einige der in den verschiedenen Arbeitspaketen erzielten Teilergebnisse wurden bereits in Kapitel 5 dokumentiert. Nachfolgend werden nun die in den Arbeitspaketen

erzielten Ergebnisse mit unmittelbarem Bezug zu den zentralen inhaltlichen Fragestellungen des Teilprojektes Messnetz dargestellt.

Raumzeitliche Differenzierung der NO₂-Konzentrationen am Untersuchungsstandort Landshuter Allee

Auf der Grundlage der modellierten NO₂-Konzentrationswerte an den Standorten des low-cost Messnetzes (siehe Kap. 5.4) kann die NO₂-Verteilung im Untersuchungsgebiet an der Landshuter Allee in raumzeitlicher Differenzierung dargestellt werden. Abbildung 22 zeigt ausgewählte Perzentilwerte (98%-, 95%-, 90%-, 50%-Perzentil) der NO₂-Konzentration an ausgewählten Standorten des low-cost Messnetzes.

Sichtbar wird eine ausgeprägte räumliche Differenzierung mit entlang der Landshuter Allee markant gegenüber den weiter von der Hauptemissionsquelle entfernten Standorten erhöhten NO₂-Konzentrationswerten, wobei die Unterschiede für die hohen Perzentile (90%, 95%, 98%) deutlich stärker ausfallen als für das 50%-Perzentil.

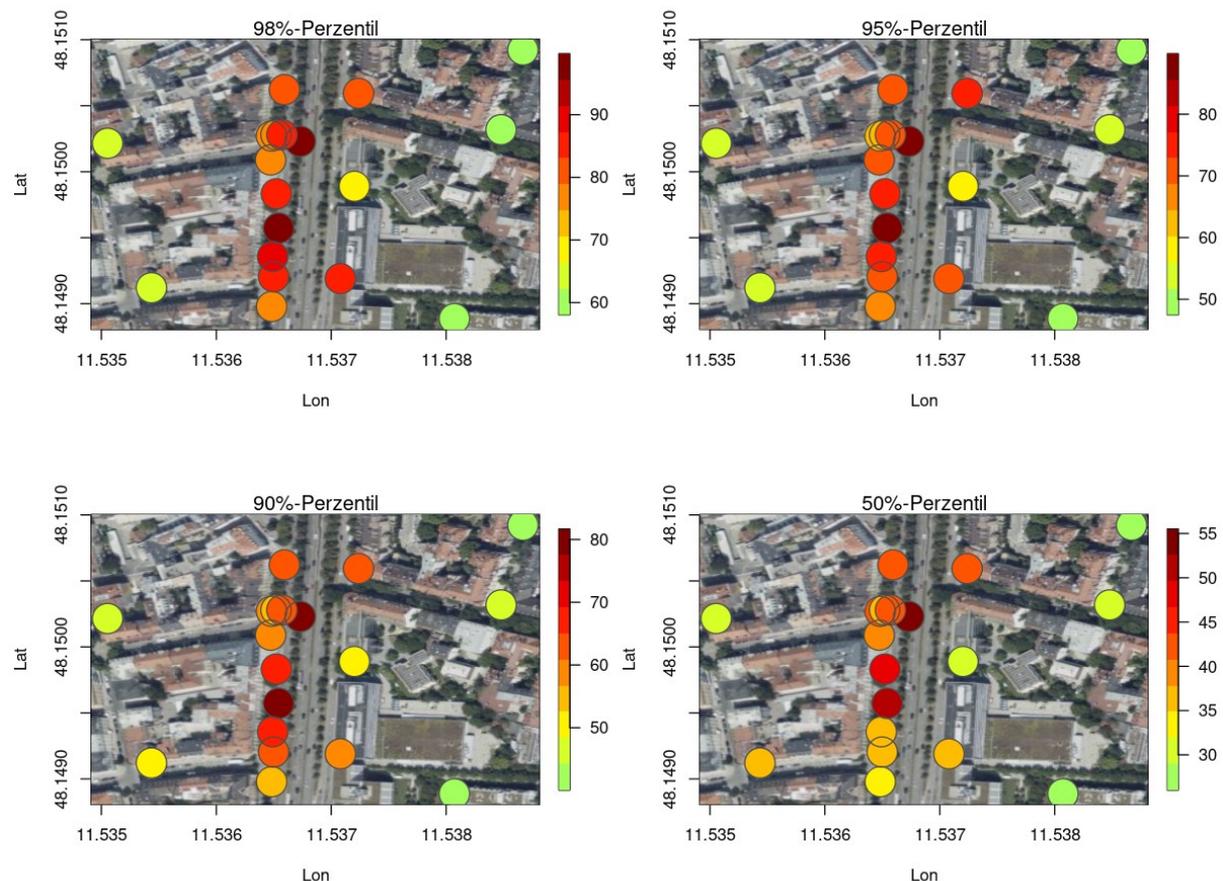


Abbildung 22: Ausgewählte Perzentilwerte (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für das 98%-, 95%-, 90%-, 50%-Perzentil) der modellierten NO₂-Konzentrationswerte an den Standorten des low-cost Messnetzes. Der zugrunde gelegte Bezugszeitraum beruht für jeden Standort auf den jeweils maximal verfügbaren modellierten NO₂-Werten. Standorte mit stark eingeschränkter Datenverfügbarkeit sind nicht dargestellt.

Für repräsentative Standorte in unmittelbarer Nähe sowie in größerer Entfernung westlich und östlich der Landshuter Allee illustrieren die Abbildungen 23 und 24

mittlere Tages- und Wochengänge der driftkorrigierten NO₂-Stundenmittelwerte für den Zeitraum vom 24.06.2022 bis 30.09.2023.

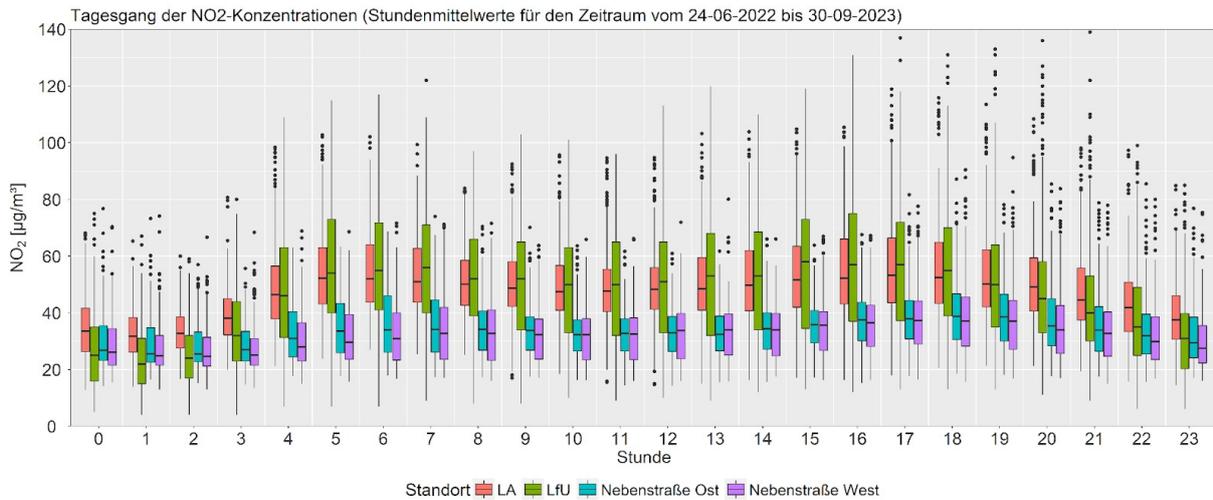


Abbildung 23: Tagesgang der driftkorrigierten NO₂-Stundenmittelwerte für ausgewählte Standorte für den Zeitraum vom 24.06.2022 bis 30.09.2023, sowie der Referenzwerte der LÜB-Station Landshuter Allee.

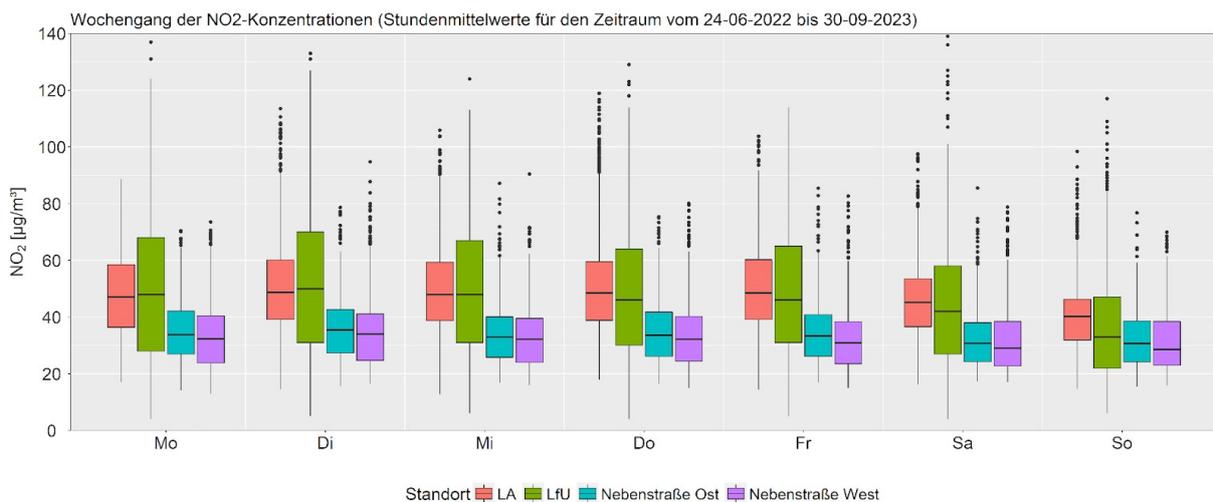


Abbildung 24: Wochengang der driftkorrigierten NO₂-Stundenmittelwerte für ausgewählte Standorte für den Zeitraum vom 24.06.2022 bis 30.09.2023, sowie der Referenzwerte der LÜB-Station Landshuter Allee.

Der beispielhaft dargestellte mittlere Tagesgang zeigt einen generell typischen Verlauf. Die NO₂-Konzentrationen weisen während der Nachtstunden die geringsten Werte auf und steigen in den Morgenstunden stark an, was zu einem ersten Peak führt. Am späteren Vormittag sinken die Werte leicht und erreichen am späten Nachmittag einen weiteren Peak, bevor sie in den Abendstunden absinken. Die zwei Tagesmaxima sind mit dem typischen hohen Verkehrsaufkommen vormittags und nachmittags erklärbar. Die Standorte an der Landshuter Allee weisen generell höhere Werte auf als die Standorte in den Nebenstraßen. Der Wochengang zeigt ebenfalls einen für sich typischen Verlauf. Montag bis Freitag sind die höchsten NO₂-Werte zu beobachten, während die NO₂-Konzentrationen am Wochenende sinken. Dieser Verlauf ist an der unmittelbar emissionsexponierten Landshuter Allee deutlich zu erkennen, wohingegen er in den Nebenstraßen wesentlich geringer ausgeprägt ist.

Neben der Tages- und Wochengangdynamik der NO₂-Konzentrationen wird insbesondere auch die grundsätzliche Differenzierung in unterschiedlich stark verkehrsbelastete Standorte durch die modellierten NO₂-Konzentrationswerte konsistent wiedergegeben.

Einflussgrößen der raumzeitlichen NO₂-Variabilität

Für die 18 Wetterlagen aus der objektiven Großwettertypenklassifikation (GWT) täglicher Bodenluftdruckfelder für den Ausschnitt 11°W – 33°O, 32°N – 64°N zeigen die Abbildungen 25 und 26 die wetterlagenspezifischen Verteilungen der modellierten NO₂-Konzentrationswerte und der lokalmeteorologischen Parameter (an der Station München Stadt des Deutschen Wetterdienstes) Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Lufttemperatur (separat für Sommer – JJA und Winter – DJF).

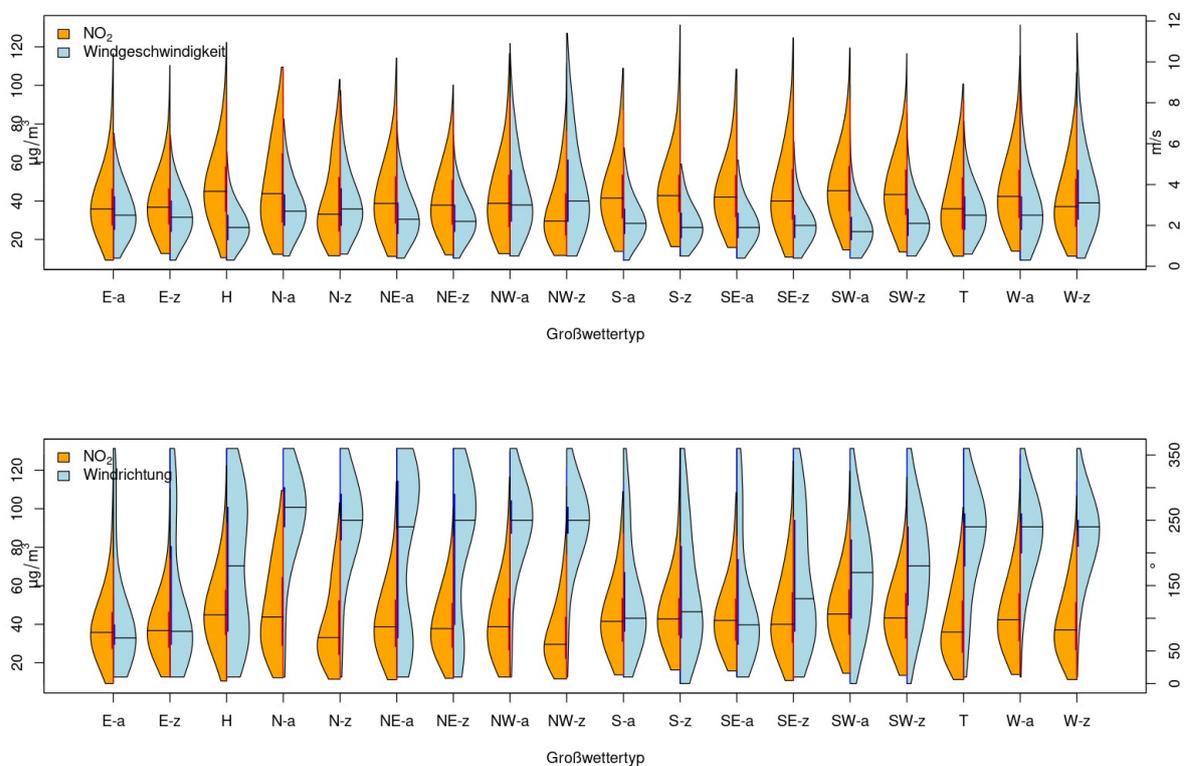


Abbildung 25: Großwettertypspezifische Verteilungen der NO₂-Konzentrationswerte (an 26 Standorten des Low-Cost Messnetzes und der Messstation München Landshuter Allee des Lufthygienischen Landesüberwachungssystems Bayern - LÜB) und (oben) der Windgeschwindigkeit bzw. (unten) der Windrichtung (Station München Stadt des Deutschen Wetterdienstes). Datengrundlage sind modellierte NO₂-Konzentrationswerte für den Zeitraum Juni 2021 bis September 2023. Großwettertyp-Bezeichnungen: Großräumige Anströmrichtungen (W)est, (S)üd(W)est, etc. und (Anti)Zyklonalität (-a/-z); H/T bezeichnen zentrale Hoch-/Tiefdruck-Lagen.

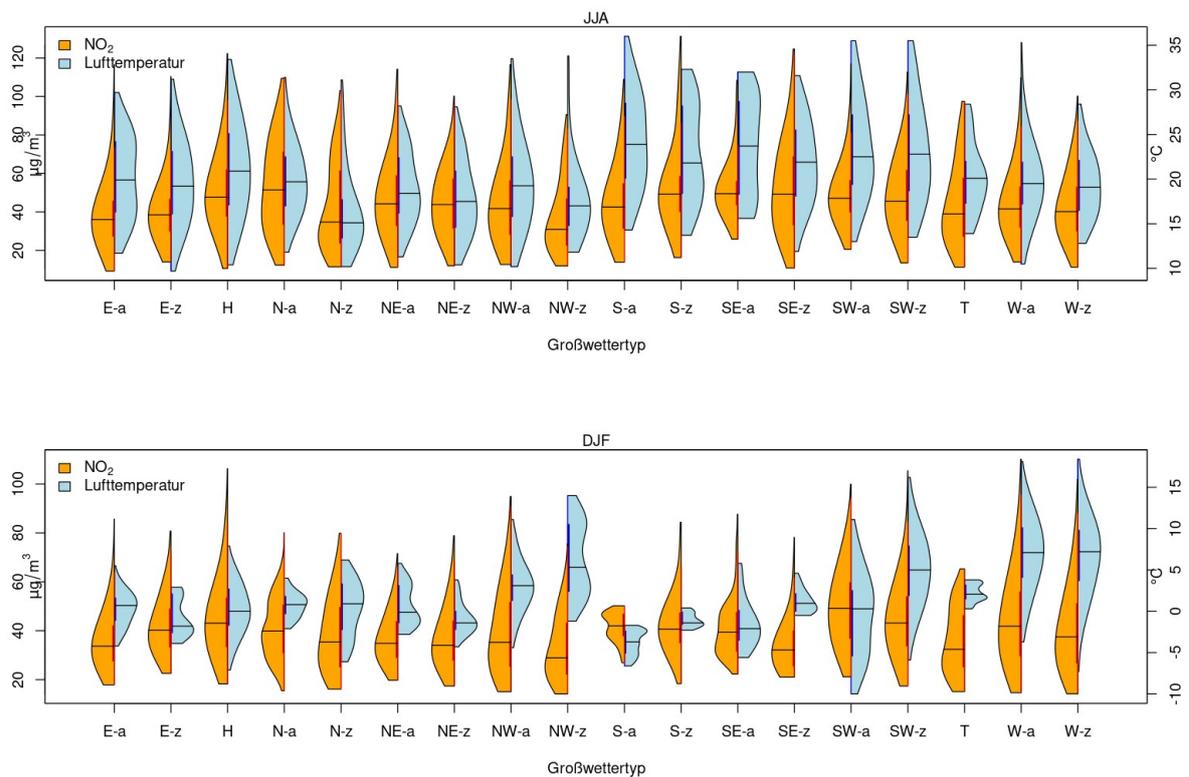


Abbildung 26: Großwettertypspezifische Verteilungen der NO_2 -Konzentrationswerte (an 26 Standorten des Low-Cost Messnetzes und der Messstation München Landshuter Allee des Lufthygienischen Landesüberwachungssystems Bayern - LÜB) und der Lufttemperatur (Station München Stadt des Deutschen Wetterdienstes) im Sommer (JJA - oben) bzw. Winter (DJF - unten). Datengrundlage sind modellierte NO_2 -Konzentrationswerte für den Zeitraum Juni 2021 bis September 2023. Großwettertyp-Bezeichnungen: Großräumige Anströmrichtungen (W)est, (S)üd(W)est, etc. und (Anti)Zyklonalität (-a/-z); H/T bezeichnen zentrale Hoch-/Tiefdruck-Lagen.

Relativ erhöhte NO_2 -Konzentrationen sind mehrheitlich mit vorherrschend antizyklonal geprägten Wetterlagen verbunden, die am Untersuchungsstandort mit reduzierten Windgeschwindigkeiten und reduziertem atmosphärischen Austausch in der bodennahen Grenzschicht sowie - im Sommer - mit erhöhten Lufttemperaturen einhergehen.

Der Bedeutsamkeit der großräumigen Wetterlage als eine Einflussgröße der lokalen NO_2 -Konzentrationen am Untersuchungsstandort wird auch aus Ergebnissen von Random Forest Modellen der raumzeitlichen NO_2 -Variabilität deutlich.

Für vier Random Forest Modelle mit unterschiedlichen Prädiktorenkombinationen zeigt Abbildung 27 die erklärte Varianz (R^2) der Modelle und die Bedeutsamkeit (%IncMSE) der jeweils berücksichtigten Prädiktorvariablen. Neben der zonalen Windkomponente (U_wnd) und der Lufttemperatur (DWD_TT_TU) ist die Wetterlage (Wetterklasse) hierbei in den Modellen rf3, rf9 und rf8 jeweils einer der führenden dynamischen Prädiktoren.

Mit Blick auf die erklärten Varianzen der Modelle zeigt sich, dass durch die Kombination von statischen und dynamischen synoptischen und meteorologischen Prädiktoren - die in separaten Modellen ca. 30% (rf2) bzw. 60% (rf3) Varianzerklärung erreichen - ein R^2 -Wert von über 75% erreicht werden kann. Durch die Hinzunahme von Emissionsschätzungen (stellvertretend für die westliche

Fahrspur W4) aus dem TP Verkehr lässt sich die erklärte Varianz weiter auf knapp 80% erhöhen.

Für drei ausgewählte Messstandorte zeigt Abbildung 28 die Verteilungen (Dichteplots) der jeweils am Standort aus low-cost Messungen ermittelten NO₂-Werte sowie der mittels dreier verschiedener Random Forest Modelle modellierten Werte. Die Dichteplots verdeutlichen, dass eine zufriedenstellende Annäherung der modellierten Werte an die Prädiktandenwerte erst bei Kombination von statischen, zeitlichen (Wochentag und Uhrzeit) und dynamischen synoptischen und meteorologischen Prädiktorvariablen erreicht wird.

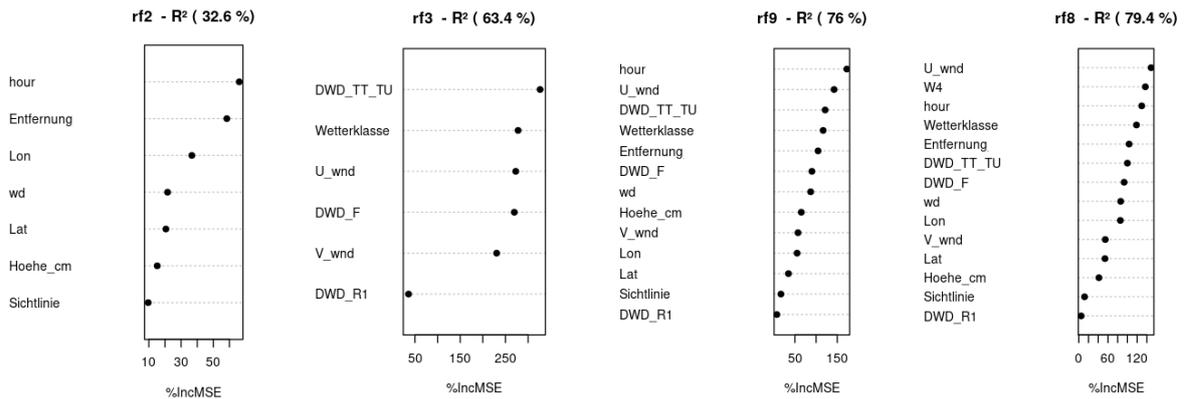


Abbildung 27: Erklärte Varianz (R²) und Bedeutsamkeit der Prädiktoren ("Permutation Importance" %IncMSE) für verschiedene Random Forest Modelle (rf2, rf3, rf9, rf8), zur Abschätzung der NO₂-Konzentrationswerte an den Standorten des low-cost Messnetzes. rf2 - Zeit und statische Prädiktoren; rf3 - dynamische meteorologische Prädiktoren; rf9 - Zeit, statische und dynamische meteorologische Prädiktoren; rf8 - wie rf9 und zusätzlich Emissionsschätzungen (W4).

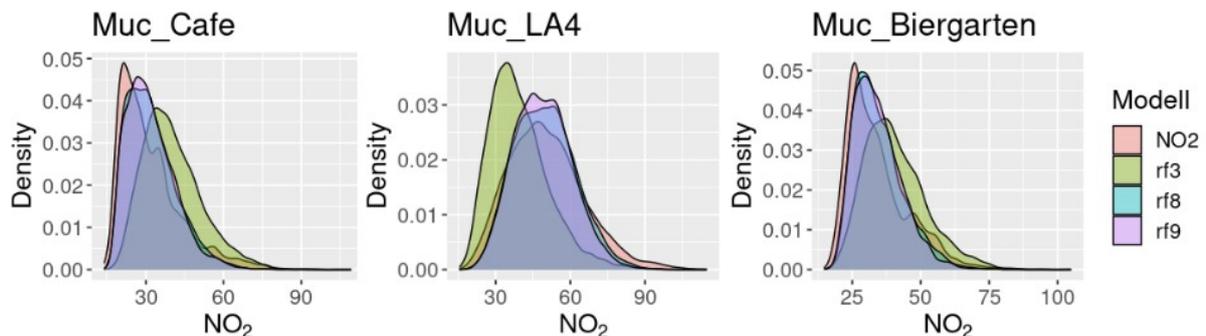


Abbildung 28: Dichteplots modellierter NO₂-Verteilungen (in µg/m³) an drei ausgewählten Standorten des low-cost Messnetzes. NO₂ - für den Standort aus low-cost Messungen abgeschätzte NO₂-Konzentrationswerte; rf3, rf8, rf9 - NO₂-Konzentrationswerte aus Random Forest Modellen mit unterschiedlichen Prädiktorenkombinationen: rf3 - dynamische meteorologische Prädiktoren; rf9 - Zeit, statische und dynamische meteorologische Prädiktoren; rf8 - wie rf9 und zusätzlich Emissionsschätzungen (W4).

Die Ergebnisse der statistischen Modelle räumlicher NO₂-Variabilität verdeutlichen zum einen die Relevanz statischer (insbesondere Entfernung zu Emissionsquellen) und dynamischer (synoptische und meteorologische) Einflussgrößen. Zum anderen zeigt sich, dass die Ergänzung emissionsrelevanter zeitlicher Prädiktoren (Wochentag und Uhrzeit) durch Emissionsdaten nur eine relativ geringe Erhöhung der Modellperformanz bewirkt.

Daraus lässt sich die grundsätzliche Eignung der eingesetzten Methoden des Maschinellen Lernens zur Abschätzung der lokalen raumzeitlichen NO₂-Variabilität – auch für Standorte ohne Messungen – ohne die Notwendigkeit der Verfügbarkeit von Emissionsdaten oder NO₂-Messwerten von Referenzstationen (die NO₂-Messwerte der LÜB-Station Landshuter Allee wurden in den Modellen nicht verwendet) folgern. Einschränkend muss angemerkt werden, dass die erstellten Modelle im Rahmen des Projektes noch nicht einer umfassenden Validierung unterzogen werden konnten. Mit Blick auf die nachfolgend thematisierten Untersuchungen zur Wirksamkeitseinschätzung der installierten Luftreinigungssysteme lässt sich ergänzen, dass die Berücksichtigung von deren variierenden Betriebszuständen in den statistischen Modellen zu keiner relevanten Verbesserung der Modellgüte führt.

Wirksamkeit der installierten Luftreinigungssysteme

Die Untersuchung der Wirksamkeit der installierten Luftreinigungssysteme wurde auf Basis der im Projektverlauf wiederholt durchgeführten An- und Abschaltversuche durchgeführt, in deren Zuge die Luftreinigungssysteme für unterschiedlich lange Zeitintervalle – 1 Stunde, 3 Stunden, 24 Stunden – in einem Wechselbetrieb (on/off Betrieb) liefen.

Im Rahmen der durchgeführten Wirksamkeitsanalysen wurden ausschließlich die Differenzwerte der modellierten NO₂-Konzentrationen der low-cost Messsysteme zwischen „aktivem“ und jeweils vorangegangenen „inaktivem“ Betriebszustand untersucht. Negative Differenzwerte indizieren hierbei während der on-Phasen reduzierte NO₂-Konzentrationswerte und deuten damit auf eine vorhandene Reinigungswirkung der Luftreinigungssysteme hin.

In den Abbildungen 29 und 30 sind die eben erwähnten Differenzwerte der driftkorrigierten modellierten NO₂-Stundenmittel für ausgewählte Standorte an der Landshuter Allee für zwei ausgewählte Zeiträume mit an der LÜB-Station erhöhten gemessenen NO₂-Konzentrationen dargestellt. Abbildung 29 zeigt den Zeitraum vom 23.03.2022 (12 Uhr) bis 28.03.2022 (12 Uhr), während Abbildung 30 den Zeitraum vom 10.05.2022 (12 Uhr) bis 12.05.2022 (23 Uhr) darstellt. Es ist für beide Zeiträume ersichtlich, dass keine mehrheitlich negativen Differenzen zu verzeichnen sind. Die Differenzen sind sowohl im positiven als auch negativen Bereich zu verorten und zeigen keinerlei erkennbares Muster.

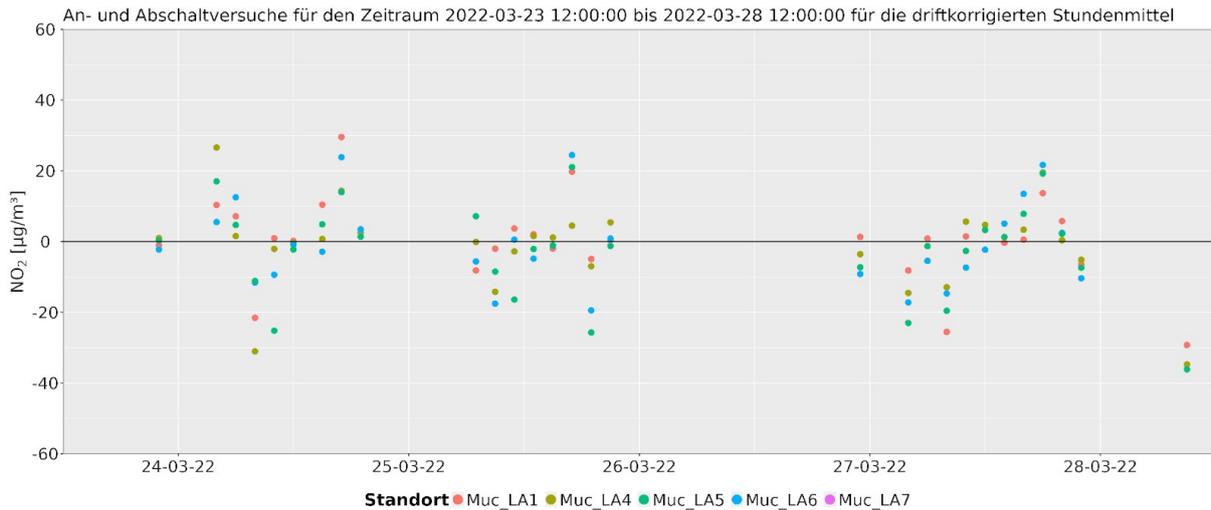


Abbildung 29: Differenzwerte der driftkorrigierten modellierten NO_2 -Stundenmittel für ausgewählte Standorte an der Landshuter Allee für den Zeitraum vom 23.03.2022 (12 Uhr) bis 28.03.2022 (12 Uhr).

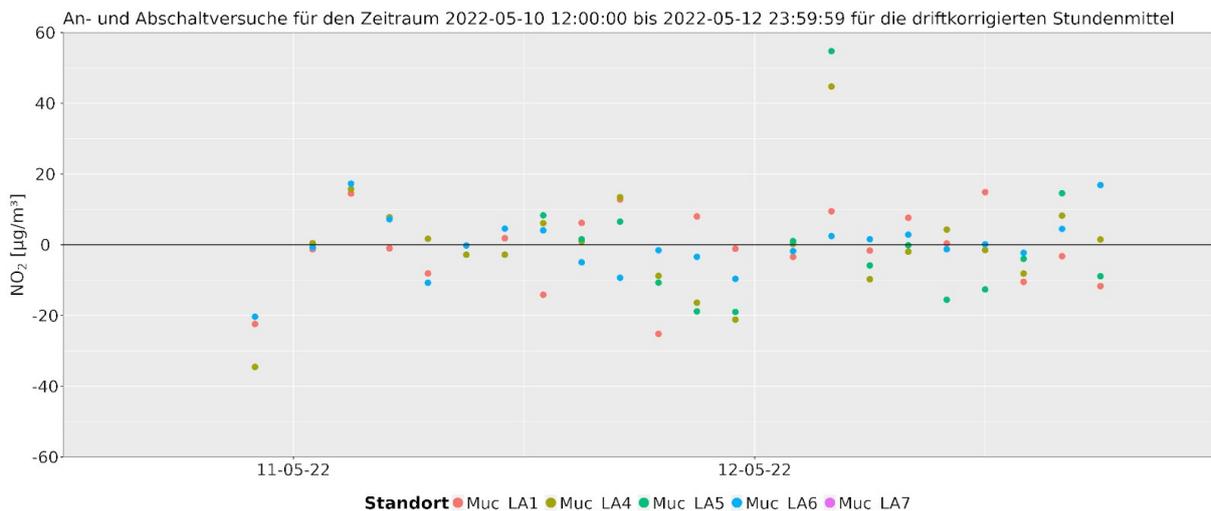


Abbildung 30: Differenzwerte der driftkorrigierten modellierten NO_2 -Stundenmittel für ausgewählte Standorte an der Landshuter Allee für den Zeitraum vom vom 10.05.2022 (12 Uhr) bis 12.05.2022 (23 Uhr).

Abbildung 31 illustriert – separat für die drei unterschiedlichen Wechselbetriebsphasen (1 h, 3 h, 24 h) der Luftreinigungssysteme – die Verteilungen der Differenzwerte zwischen aktivem und jeweils vorangehendem inaktiven Betriebszustand. Die für die einzelnen Standorte des low-cost Messnetzes ermittelten Differenzwerte sind hierbei nach der Distanz der Standorte zum jeweils nächstgelegenen Luftreinigungssystem in Entfernungsklassen gruppiert.

Über alle Entfernungsklassen und für die drei on/off Betriebsphasen dominieren Werteverteilungen mit Medianen nahe Null und symmetrischer Verteilungscharakteristik. Erkennbare Abweichungen hiervon – mit negativen Medianwerten – sind vor allem für die Entfernungsklasse 0-2 m bei 1-stündigem on/off Betrieb und für die Entfernungsklasse 2-5 m bei 3-stündigem on/off Betrieb augenfällig. Gegenteilige Abweichungen – positive Medianwerte – fallen bei den Entfernungsklassen 5-10 m und 10-20 m bei 24-stündigem on/off Betrieb auf. In allen

Fällen liegen die Abweichungen der Medianwerte von 0 aber im unteren einstelligen $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Bereich.

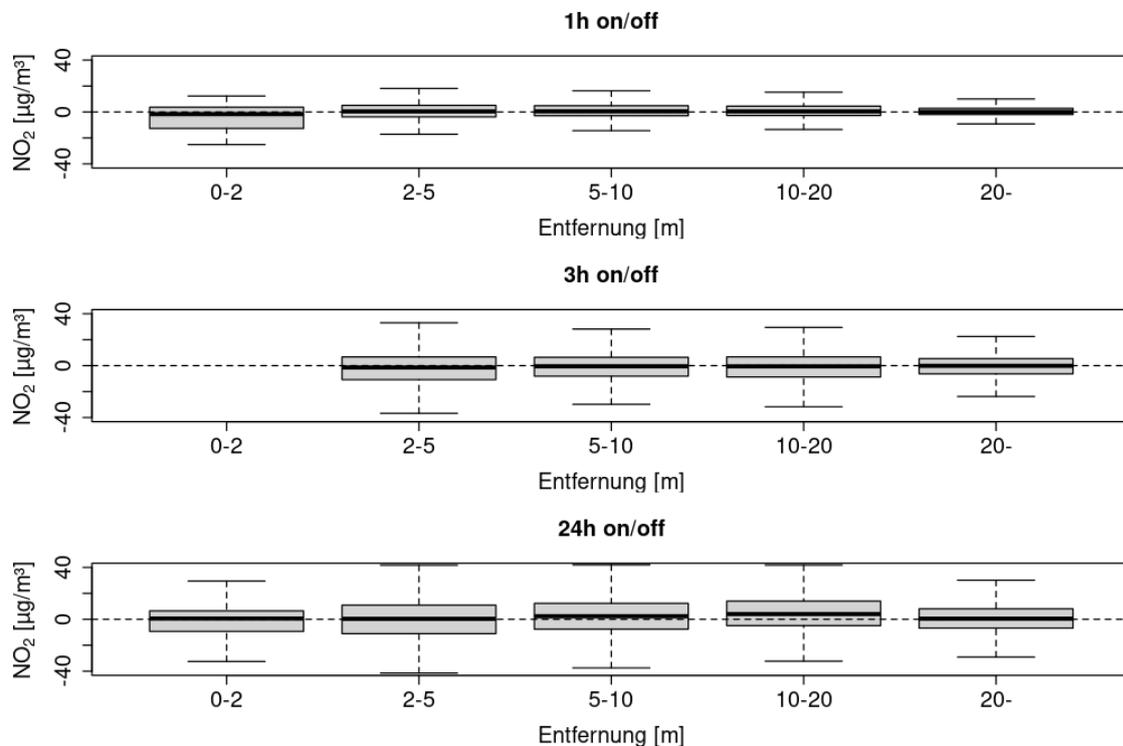


Abbildung 31: Filterwirkung der Luftreinigungssysteme an Standorten des low-cost Messnetzes, gruppiert nach der Entfernung zur jeweils nächstgelegenen Luftreinigungssäule. Boxplots der Differenzwerte [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] der NO₂-Konzentrationen zwischen „aktivem“ und vorangehendem „inaktivem“ Betriebszustand (berücksichtigt sind 1-, 3- und 24-stündige on/off Betriebsphasen).

Entsprechend zeigen sich bei Betrachtung der Differenzwerte der Mediane an den Standorten des low-cost Messnetzes (Abbildung 32) ebenfalls insgesamt nur sehr niedrige Werte. Für den 1-stündigen on/off Betrieb treten - sehr geringe negative Differenzwerte ausschließlich an Messstandorten im unmittelbaren Nahbereich von Luftreinigungssystem 13 (Einmündung Schlörstraße) auf. Bei 3-stündigen on/off Betrieb treten negative Differenzwerte - allerdings auch hier äußerst schwach ausgeprägt - vornehmlich an Standorten im Nahfeld der Luftreinigungssysteme an der Westseite der Landshuter Allee auf. Für den 24-stündigen on/off Betrieb schließlich zeigen sich keine konsistenten räumlichen Muster, die auf eine - auf Grundlage der low-cost NO₂-Abschätzungen - nachweisbare Reinigungswirkung hindeuten.

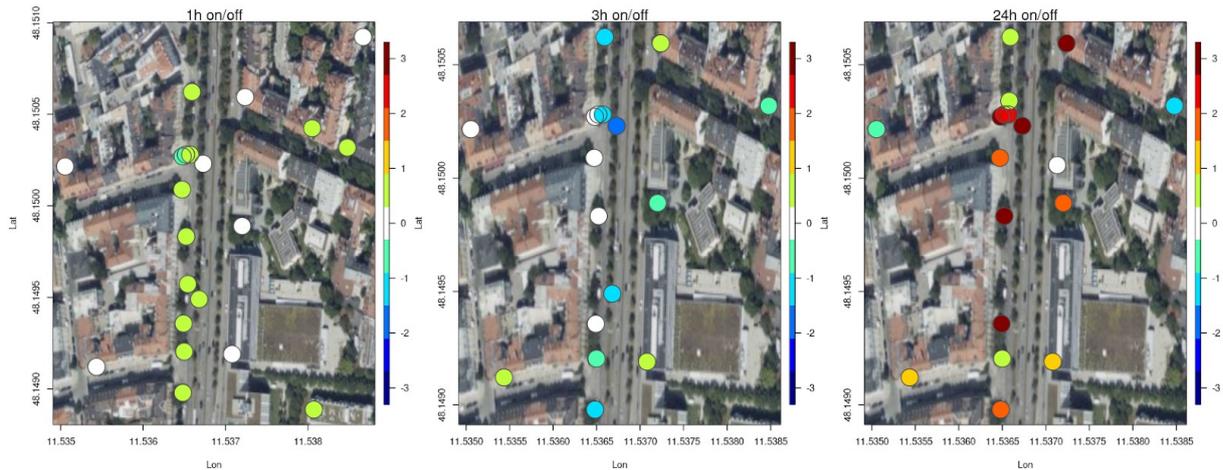


Abbildung 32: Filterwirkung der Luftreinigungssysteme an ausgewählten Standorten des low-cost Messnetzes. Mediane der Differenzwerte [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] der NO_2 -Konzentrationen zwischen „aktivem“ und vorangehendem „inaktivem“ Betriebszustand (berücksichtigt sind 1-, 3- und 24-stündige on/off Betriebsphasen).

Ergänzend zeigen die Abbildungen 33 bis 35 – wiederum getrennt für die drei unterschiedlichen Wechselbetriebsphasen der Luftreinigungssysteme – Histogramme der NO_2 -Differenzwerte an den Standorten des low-cost Messnetzes.

Grundsätzlich zeigen sich an allen Standorten symmetrisch um 0 orientierte Verteilungen, ohne klar ausgeprägte Verschiebungen des Wertespektrums in Richtung der negativen oder positiven Werte. Nur für einen Standort – Muc_LA7 – ergibt sich für den 3-stündigen on/off Betrieb aus einem Einstichproben t-Test ein signifikant von 0 verschiedener Mittelwert der Differenzwerte (bei Zugrundelegung einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%). Im on-Betrieb der Luftreinigungssysteme reduzierte NO_2 -Konzentrationswerte an einigen weiteren Standorten und unter unterschiedlichen on/off Betriebsphasen, wie sie sich in den Abbildungen 31 und 32 andeuten, lassen sich aus den Histogrammen in den Abbildungen 33 bis 35 zwar nachvollziehen, sie erreichen aber jeweils keine statistische Signifikanz.

Unter Beschränkung auf die für Standorte im Nahfeld der Luftreinigungssysteme – bis 5 m Distanz – ermittelten Differenzwerte wurde abschließend untersucht inwieweit sich eine Differenzierung der oben dokumentierten, wenngleich äußerst schwach ausgeprägten Reinigungsleistung in Abhängigkeit von der jeweils ausgeprägten Wetterlage ergibt. Aus Abbildung 36 wird eine Differenzierung nach Großwettertypen deutlich, die NO_2 -Reduktionen vor allem bei den zyklonalen Subtypen von Wetterlagen mit großräumiger Anströmung aus dem nördlichen Richtungssektor (N-z, NE-z, NW-z) und bei Großwettertyp W-z beinhaltet. Insbesondere für Großwettertyp NE-z – mit den deutlichsten NO_2 -Reduzierungen – sind hierbei einschränkend allerdings vergleichsweise geringe Stichprobenumfänge zu berücksichtigen.

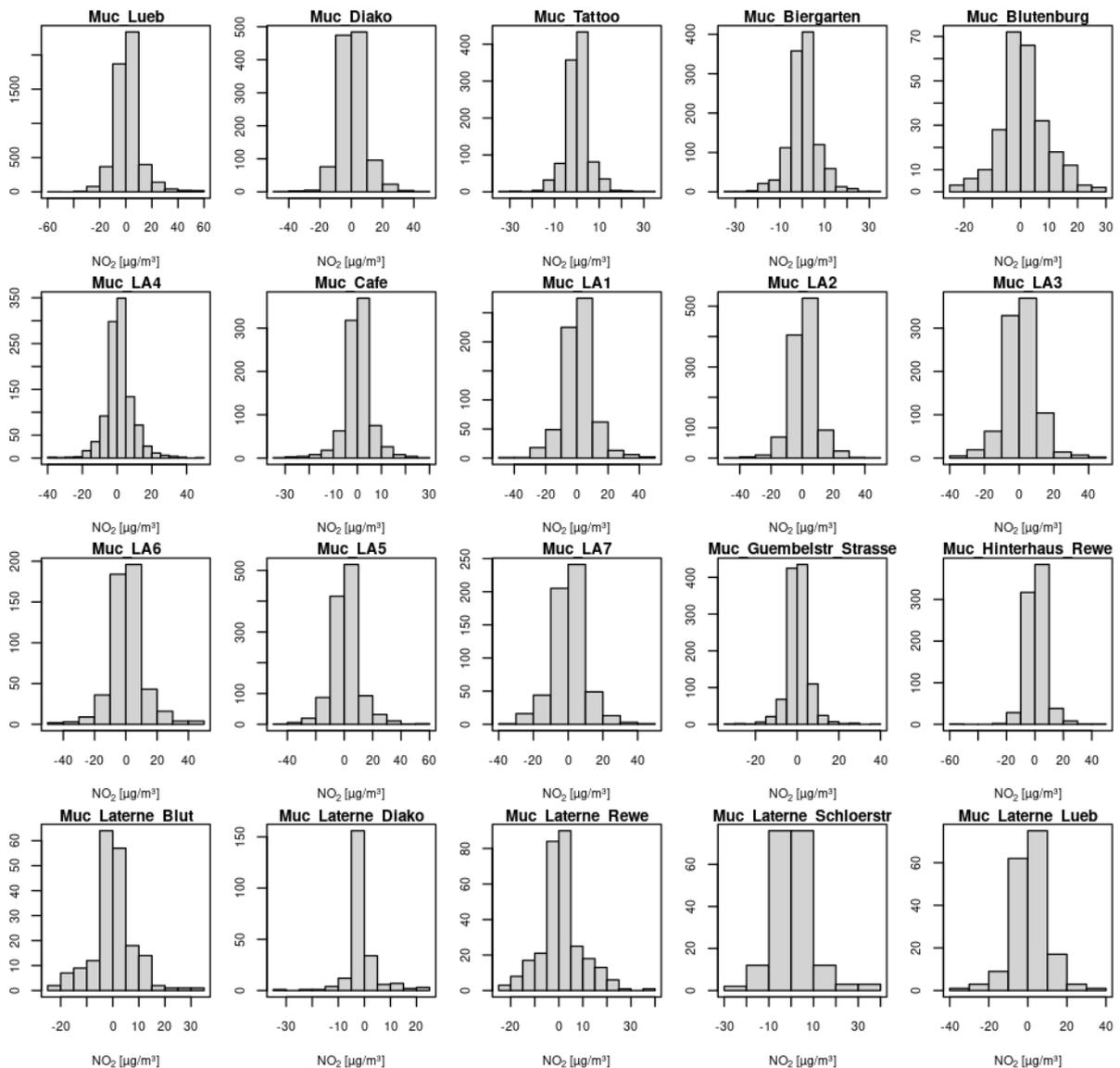


Abbildung 33: Filterwirkung der Luftreinigungssysteme an Standorten des low-cost Messnetzes. Histogramme der Differenzwerte [µg/m³] der NO₂-Konzentrationen zwischen „aktivem“ und vorangehendem „inaktivem“ Betriebszustand für 1-stündige on/off Betriebsphasen.

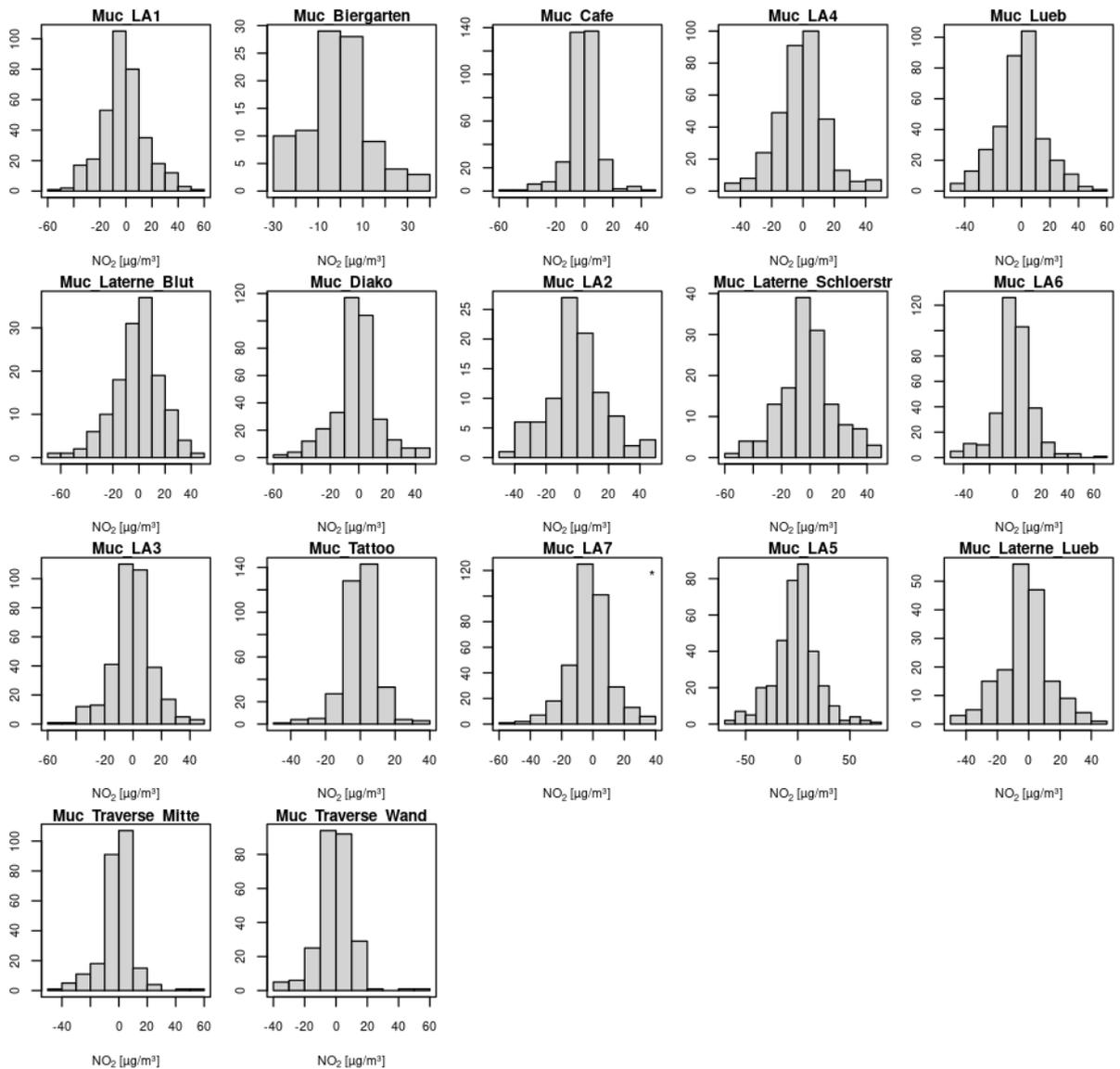


Abbildung 34: Filterwirkung der Luftreinigungssysteme an Standorten des low-cost Messnetzes. Histogramme der Differenzwerte $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ der NO_2 -Konzentrationen zwischen „aktivem“ und vorangehendem „inaktivem“ Betriebszustand für 3-stündige on/off Betriebsphasen.

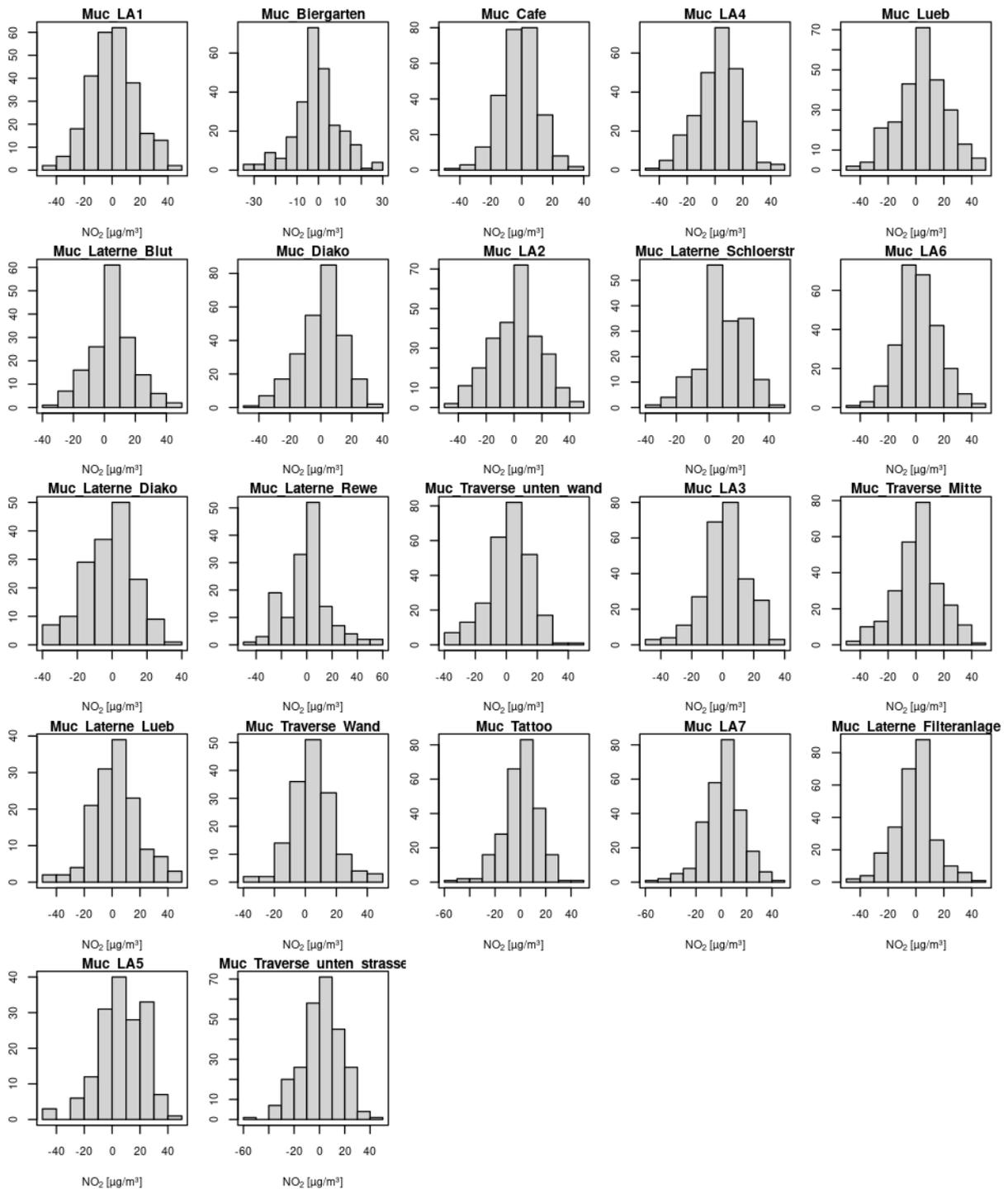


Abbildung 35: Filterwirkung der Luftreinigungssysteme an Standorten des low-cost Messnetzes. Histogramme der Differenzwerte [µg/m³] der NO₂-Konzentrationen zwischen „aktivem“ und vorangehendem „inaktivem“ Betriebszustand für 24-stündige on/off Betriebsphasen.

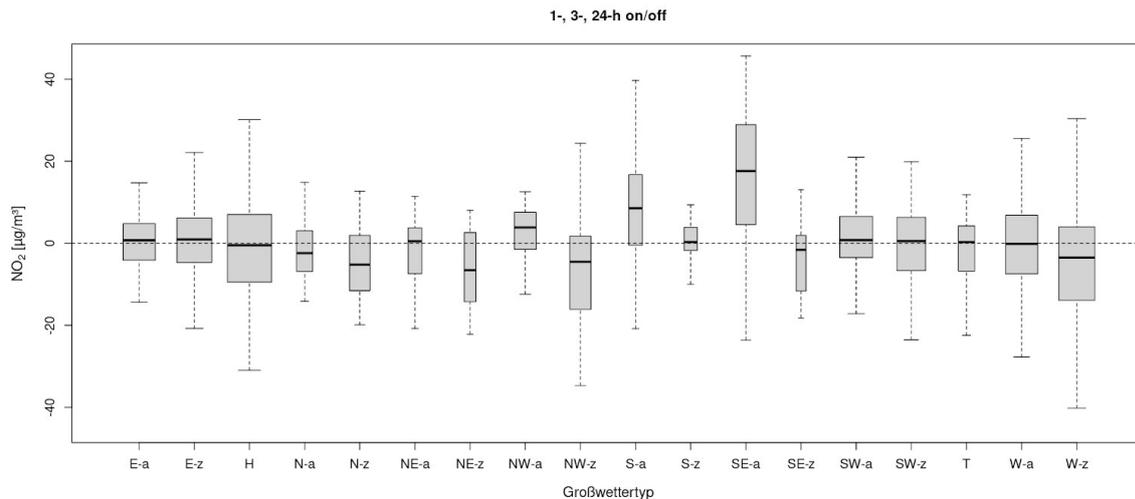


Abbildung 36: Differenzwerte [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] der NO_2 -Konzentrationen zwischen „aktivem“ und vorangehendem „inaktivem“ Betriebszustand (berücksichtigt sind 1-, 3- und 24-stündige on/off Betriebsphasen) in Abhängigkeit von der Wetterlage (Großwettertyp). Ermittelt für Standorte des Low-Cost Messnetzes im Nahbereich der Luftreinigungssysteme (Horizontaldistanz max. 5 m). Großwettertyp-Bezeichnungen: Großräumige Anströmrichtungen (W)est, (S)üd(W)est, etc. und (Anti)Zyklonalität (-a/-z); H/T bezeichnen zentrale Hoch-/Tiefdruck-Lagen. Die variierende Breite der Boxplots indiziert unterschiedliche zugrunde liegende Stichprobenumfänge.

10 Zusammenfassung

Das vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) finanzierte Verbund-Forschungsvorhaben „Reinigen neue Luftfiltersysteme von urbanem Stickstoffdioxid?“ untersucht, inwieweit an der Landshuter Allee in München installierte aktive Luftreinigungssysteme eine effektive Reduzierung der Stickstoffdioxidkonzentrationen in der bodennahen Luft bewirken.

Im Teilprojekt Messnetz, das vom 01.10.2020 bis 31.12.2023 am Lehrstuhl für Physische Geographie mit Schwerpunkt Klimaforschung der Universität Augsburg bearbeitet wurde stand die Bearbeitung dreier Arbeitspakete im Vordergrund:

- Die Konzeption, der Aufbau und der Betrieb eines NO_2 -Messnetzes im Umfeld der Landshuter Allee auf der Basis von kostengünstigen Luftqualitätssensoren, um damit eine Datenbasis für weiterführende Analysen der NO_2 -Konzentrationen im Umfeld der Landshuter Allee bereitzustellen.
- Die Entwicklung von Wetterlagenklassifikationen zur quantitativen Charakterisierung der großräumigen synoptischen Strömungsverhältnisse, als einer relevanten Einflussgröße der lokalen lufthygienischen Situation.
- Die statistische Modellierung der raumzeitlich differenzierten NO_2 -Konzentrationen im Untersuchungsgebiet und darauf aufbauende Analysen wesentlicher Einflussgrößen der NO_2 -Variabilität sowie Abschätzungen zur Wirksamkeit der installierten Luftreinigungssysteme.

Im Verlauf des Teilprojektes konnte ein low-cost NO_2 Messnetz mit insgesamt 23 Standorten aufgebaut und - in standortspezifisch unterschiedlicher zeitlicher Abdeckung - über die Projektlaufzeit betrieben werden. Mittels nichtlinearer statistischer Modellierungsansätze wurde aus den Messwerten der low-cost Messsysteme ein Datensatz raumzeitlich verteilter stündlicher NO_2 -

Konzentrationswerte erstellt. Die Verlässlichkeit der modellierten Werte wurde in Kreuzvalidierungsexperimenten überprüft und eine über die Betriebszeit der low-cost Systeme stattgefundene Sensordrift berücksichtigt.

Auf der Grundlage großräumiger atmosphärischer Felder aus Reanalyse-Modelldaten wurden objektive Wetterlagen ermittelt, die wesentliche Zusammenhänge zwischen synoptischer Situation und lokaler Meteorologie und NO₂-Konzentration am Untersuchungsstandort erfassen.

Aus den modellierten NO₂-Konzentrationswerten ergeben sich plausible räumliche und zeitliche Differenzierungen der NO₂-Konzentrationen entlang der Landshuter Allee und in ihrem Umfeld. Weiterführende, auf Ansätzen des Maschinellen Lernens beruhende Modellstudien erlauben zum einen die Identifikation wesentlicher – sowohl statischer (z. B. Entfernung zur Landshuter Allee) als auch dynamischer (z. B. Wetterlage, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur) – Einflussgrößen der NO₂-Variabilität und belegen zum anderen die Eignung entsprechender Modellierungsansätze zur Abschätzung raumzeitlicher NO₂-Variabilität auf der lokalen urbanen Skala. Als einschränkendes Moment ist anzuführen, dass eine umfassende Kreuzvalidierung der Modellansätze in der Projektlaufzeit nicht mehr realisiert werden konnte.

Hinsichtlich der zentralen inhaltlichen Fragestellung des Gesamtprojekts nach der Reinigungsleistung der installierten Luftreinigungssysteme ergibt sich aus den Analysen der low-cost basierten NO₂-Konzentrationswerte die Einschätzung, dass eine Wirksamkeit der Filtersysteme nur in deren Nahbereich (wenige Meter Horizontaldistanz) und nur in einem sehr geringen Umfang (wenige µg/m³) festzustellen ist. An dieser Stelle wird auch auf die Analysen im Abschlussbericht des Teilprojekts 1 verwiesen.

11 Ausblick

Die im Rahmen des Projekts entwickelten und an der Landshuter Allee eingesetzten Low-Cost-Messsysteme wurden im November 2023 – nach Beendigung einer abschließenden Vergleichsmesskampagne an der Station Landshuter Allee des Lufthygienischen Landesüberwachungssystems Bayern – nach Augsburg gebracht. Dort werden sie – nach Austausch der nach drei Jahren Betriebszeit erschöpften elektrochemischen Luftqualitätssensoren – in das bestehende, vom Lehrstuhl für Physische Geographie mit Schwerpunkt Klimaforschung betriebene stadtklimatologische und lufthygienische Messnetz integriert und können somit einer adäquaten Folgenutzung zugeführt werden.

Zwei Messboxen wurden nach Beendigung der Messungen zum Projektpartner an der OTH Regensburg geschickt, um diese dort hinsichtlich ihrer Sensitivität zu untersuchen. Aus den Ergebnissen, die zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht vorlagen, sind relevante Erkenntnisse zur Zuverlässigkeit elektrochemischer Low-Cost-Sensoren nach langen Betriebszeiten zu erwarten, die eine wichtige Information für deren Einsatz in Folgestudien darstellen.

Die aus dem Projekt resultierenden Erfahrungen und Erkenntnisgewinne zum Betrieb von Low-Cost Luftqualitätssensoren und zur Datenmodellierung und -analyse werden von der Augsburger Arbeitsgruppe in zukünftigen Forschungsaktivitäten und in bestehenden oder im Aufbau befindlichen Forschungs Kooperationen (beispielsweise mit der Professur für Umweltsensorik und Modellierung an der TUM School of Computation, Information and Technology) aufgegriffen werden.

12 Referenzen

- Alphasense - NO₂ (2019): NO₂-B43F Nitrogen Dioxide Sensor 4-Electrode. <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/NO2-B43F.pdf>
- Alphasense - O₃ (2019): OX-B431 Oxidising Gas Sensor Ozone + Nitrogen Dioxide 4-Electrode. <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/OX-B431.pdf>
- Araki, S.; Shima, M.; Yamamoto, K. (2018): Spatiotemporal land use random forest model for estimating metropolitan NO₂ exposure in Japan. *Sci. Total Environ.* 634, 1269–1277.
- Azmi, W. N. F. W., Pillai, T. R., Latif, M. T., Koshy, S., Shaharudin, R. (2023): Application of land use regression model to assess outdoor air pollution exposure: A review. *Environmental Advances* 11 <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100353>
- Beck C., J. Jacobeit and P. D. Jones (2007): Frequency and within-type variations of large scale circulation types and their effects on low-frequency climate variability in Central Europe since 1780. *Int. J. Climatol.* 27: 473-491.
- Beck C. and A. Philipp (2010): Evaluation and comparison of circulation type classifications for the European domain. *Physics and Chemistry of the Earth* 35: 374-387.
- Beck, C., C. Weitnauer and J. Jacobeit (2014): Downscaling of monthly PM₁₀ indices at different sites in Bavaria (Germany) based on circulation type classifications. *Atmospheric Pollution Research* 5: 741-752, doi: 10.5094/APR.2014.083
- Beck, C., A. Philipp and J. Jacobeit (2015): Interannual drought index variations in Central Europe related to the large-scale atmospheric circulation - application and evaluation of statistical downscaling approaches based on circulation type classifications. *Theoretical and Applied Climatology* 121: 713-732.
- Beck C., A. Philipp and F. Streicher (2016): The effect of domain size on the relationship between circulation type classifications and surface climate. *Int. J. Climatol.* 36: 2692-270.
- Bigi A., M. Mueller, S. K. Grange, G. Ghermandi and C. Hueglin (2018): Performance of NO, NO₂ low cost sensors and three calibration approaches within a real world application. *Atmos. Meas. Tech.* 11: 3717-3735.
- Bisignano, A., Carotenuto, F., Zaldei, A. & Giovannini, L. (2022): Field calibration of a low-cost sensors network to assess traffic-related air pollution along the Brenner highway. *Atmospheric Environment*, 275, 119008.
- BMJ (2010): Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes*) (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen - 39. BImSchV). https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_39/index.html
- Breiman, L. (2001): Random forests. *Machine Learning* 45: 5-32
- Budde, M., Riedel, T., Beigl, M., Schäfer, K., Emeis, S., Cyrus, J., Schnelle-Kreise, J., Philipp, A., Ziegler, V., Grimm, H., Gratza, T. (2017): SmartAQnet - Remote and In-Situ Sensing of Urban Air Quality. In: *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXII*, edited by Adolfo Comerón, Evgueni I. Kassianov, Klaus Schäfer, Richard H. Picard, Konradin Weber, Proceedings of SPIE, SPIE, Bellingham, WA, USA, Vol. 10424, 104240C-1 - 104240C-8
- Chen, T.H., Hsu, Y.C., Zeng, Y.T., Candice Lung, S.C., Su, H.J., Chao, H.J., Wu, C. D. (2020): A hybrid kriging/land-use regression model with Asian culture-specific

sources to assess NO₂ spatial-temporal variations. *Environ. Pollut.* 259 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113875>

Concas, F., Mineraud, J., Lagerspetz, E., Varjonen, S., Liu, X., Puolamäki, K. et al. (2021): Low-cost outdoor air quality monitoring and sensor calibration: a survey and critical analysis. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 17(2), 1-44.

Costa, S., Ferreira, J., Silveira, C., Costa, C., Lopes, D., Relvas, H., Borrego, C., Roebeling, P., Miranda, A.I., Paulo Teixeira, J. (2014): Integrating Health on Air Quality Assessment—Review Report on Health Risks of Two Major European Outdoor Air Pollutants: PM and NO₂. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 17: 307-340.

EU (2008): Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0050-20150918>

Grundström, M., Hak, C., Chen, D., Hallquist, M., Pleijel, H. (2015): Variation and co-variation of PM₁₀, particle number concentration, NO_x and NO₂ in the urban air - relationships with wind speed, vertical temperature gradient and weather type. *Atmospheric Environment* 120: 317-327.

Han P., H. Mei, D. Liu, N. Zeng, X. Tang, Y. Wang, Y. Pan (2021): Calibrations of low-cost air pollution monitoring sensors for CO, NO₂, O₃ and SO₂. *Sensors* 21, 256. <https://doi.org/10.3390/s21010256>

Hersbach H., B. Bell, P. Berrisford, et al. (2020): The ERA5 global reanalysis. *QJR Meteorol Soc.* 146: 1999- 2049.

Huth R., C. Beck, A. Philipp, M. Demuzere, Z. Untstrul, M. Cahynova J. Kysely and O. E. Tveito (2008): Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1146: 105-152.

Huth, R., C. Beck and M. Kucerova (2016): Synoptic-climatological evaluation of the classifications of atmospheric circulation patterns over Europe. *Int. J. Climatol.* 36: 2710-2726.

Jain, S., Presto, A.A., Zimmerman, N. (2021): Spatial modeling of daily PM_{2.5}, NO₂, and CO concentrations measured by a low-cost sensor network: Comparison of linear, machine learning, and hybrid land use models *Environmental Science and Technology*, 10.1021/acs.est.1c02653

Kang, Y., Aye, L., Ngo, T. D., Zhou, J. (2022): Performance evaluation of low-cost air quality sensors: A review. *Science of The Total Environment* 818: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151769>

Lu, M., Soenario, I., Helbich, M., Schmitz, O., Hoek, G., van der Molen, M., Karssenberg, D., (2020): Land use regression models revealing spatiotemporal co-variation in NO₂, NO, and O₃ in the Netherlands. *Atmos. Environ.* 223, 117238 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117238>.

Luminati, O., de Campos, B. L. D. A., Flückiger, B., Brentani, A., Röösl, M., Fink, G., & de Hoogh, K. (2021): Land use regression modelling of NO₂ in São Paulo, Brazil. *Environmental Pollution*, 289, 117832. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117832>

Mijling B., Q. Jian, D. de Jonge, S. Bocconi (2018): Field calibration of electrochemical NO₂ sensors in a citizen science context. *Atmos. Meas. Tech.* 11: 1297-1312.

Philipp A., P. M. Della-Marta, J. Jacobeit, D. R. Fereday, P. D. Jones, A. Moberg, and H. Wanner (2007): Long term variability of daily north atlantic-european pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering. *Journal of Climate*, 20(16):4065-4095.

- Philipp A., J. Bartholy, C. Beck, M. Erpicum, P. Esteban, X. Fettweis, R. Huth, P. James, S. Jourdain, F. Kreienkamp, T. Krennert, S. Lykoudis, S. Michalides, K. Pianko, P. Post, D. Rasilla Álvarez, R. Schiemann, A. Spekat, F. S. Tymvios (2010): COST733CAT - a database of weather and circulation type classifications. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35, 360-373. DOI: 10.1016/j.pce.2009.12.010.
- Philipp A., C. Beck, R. Huth and J. Jacobeit (2016): Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software. *Int. J. Climatol.* 36: 2673-2691.
- Pope, R. J., Savage, N. H., Chipperfield, M. P., Ordonez, C., Neal, L. S. (2015): The influence of synoptic weather regimes on UK air quality: regional model studies of tropospheric column NO₂. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15: 11201-11215.
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Russo, A, Trigo, R. M., Martins, H., Mendes, M. T. (2014): NO₂, PM₁₀ and O₃ urban concentrations and its association with circulation weather types in Portugal. *Atmospheric Environment* 89: 768-785.
- Rybarczyk, Y., Zalakeviciute, R. (2018): Machine Learning Approaches for Outdoor Air Quality Modelling: A Systematic Review. *Appl. Sci.* 2018, 8, 2570; doi:10.3390/app8122570
- Sensirion (2021): Datasheet SHT85 Humidity and Temperature Sensor. https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/2_Humidity_Sensors/Datasheets/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT85_Datasheet.pdf
- Shairsingh, K.K., Brook, J.R., Mihele, C.M., Evans, G.J. (2021): Characterizing long-term NO₂ concentration surfaces across a large metropolitan area through spatiotemporal land use regression modelling of mobile measurements. *Environ. Res.* 196, 111010 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111010>
- Tang, L, Chen, D, Karlsson, P.E., Gu, Y., Ou, T. (2009): Synoptic circulation and its influence on spring and summer surface ozone concentrations in southern Sweden *Boreal Environ. Res.* 14: 889-902.
- van Zoest V., F. B. Osei, A. Stein, G. Hoek (2019): Calibration of low-cost NO₂/NO₂ sensors in an urban air quality network. *Atmos. Environ.* 210: 66-75.
- Zuidema C., N. Afshar-Mohajer, M. Tatum, G. Thomas, T. Peters, K. Koehler (2018): Efficacy of Paired Electrochemical Sensors for Measuring Ozone Concentrations. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 16 (2): 1-12.

Anhang

Anhang 1 - Tagungsbeiträge

Erfassung urbaner NO₂-/O₃-Konzentrationen mittels Low-Cost Messsystemen



Verena Fricke, Florian Reich, Carlos Juan Pusch, Andreas Philipp, Christoph Beck

University of Augsburg, Institute of Geography, Physical Geography and Climate Research, Augsburg, Germany
christoph.beck@geo.uni-augsburg.de



Das Forschungsprojekt „Reinigen neue Luftfiltersysteme von urbanem Stickstoffdioxid?“, das durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz finanziert ist, untersucht in mehreren Teilprojekten am Standort Landshuter Allee in München die Wirksamkeit aktiver Luftreinigungssysteme, zur Entfernung von Stickstoffdioxid aus der Umgebungsluft an verkehrlich hoch belasteten Straßenabschnitten.

Im Teilprojekt „MESSNETZ“ (Institut für Geographie, Universität Augsburg) werden low-cost Messsysteme zur Erfassung der räumlich differenzierten Luftqualität (insbesondere NO₂-Belastung) im Bereich der Landshuter Allee in München eingesetzt:

- Verfügbare elektrochemische Luftqualitätsensoren ermöglichen den Aufbau relativ kostengünstiger, sogenannter „Low-Cost Messsysteme“, zur Erfassung der Luftqualität in höher räumlicher Differenzierung
- Aufbau von Messsystemen mit jeweils einem Alphasense Sensor B43F und OX-B431 (NO₂- & O₃-Messung) sowie dem Sensirion Sensor SHT85 (Lufttemperatur- & Luftfeuchtemessung)
- Vergleichsmessungen von 20 Systemen von Juli bis Oktober 2021, wechselnd an der LÜB-Station München Landshuter Allee und an der LÜB-Station Augsburg Königsplatz
- Erste Kalibrierungsversuche mittels multipler Regression zeigen eine hohe Übereinstimmung mit den Referenzmessungen und belegen damit die generelle Eignung der verwendeten Low-Cost Sensoren, zur Quantifizierung der NO₂-Konzentrationen im urbanen Umfeld
- Objektive Wetterlagenklassifikationen erlauben die Erfassung der großräumigen synoptischen Rahmenbedingungen lokaler lufthygienischer Belastungssituationen.



Abb. 1: Übersicht der geplanten Messstandorte an der Landshuter Allee inklusive Seitenstraßen in München. Messstandorte in blau, LÜB-Station des LFU in rot.



Abb. 2: Vergleichsmessungen mit Low-Cost Messsystemen an der LÜB-Station München Landshuter Allee.

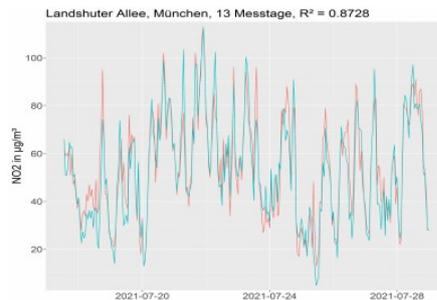


Abb. 3: NO₂-Stundenmittelwerte an der LÜB-Station Landshuter Allee in München vom 17. bis 29. Juli 2021. Gemessene Werte des LFU (in rot) und mittels multipler linearer Regression kalibrierte und mittels 2-fold Kreuzvalidierung geprüfte Werte einer Low-Cost Messbox (in blau). R² = Bestimmtheitsmaß/ erklärte Varianz.



Abb. 5: Aufbau der Low-Cost Messboxen

- 1 Hauptplatine: Raspberry Pi Zero W
- 2 Speicherkarte mit Betriebssystem: Raspberry Pi OS – 32 GB
- 3 Energie-Regler: 3.1 StromPi 3 – Mikro-USB, Wide-Range: 6V-6.1V
- 3.2 Batterie Hat – LiFePo4 / 1000mAh, 3.2 V
- 4 Datenspeicher: USB-Speicher-Stick – 128 GB
- 5 Verteilerplatine: Anschlüsse zwischen CPU und Sensoren (3.3V, 5V)
- 6 Datenübertragung I2C: Serieller Datenbus jeweils für die Alpha-Sensoren
- 7 NO₂-Sensor: Alphasense B43F, 4-electrode, low ppb
- 8 O₃-Sensor: Alphasense OX-B431, 4-electrode, low ppb
- 9 Temperatur/Feuchte-Sensor: Sensirion SHT85, Genauigkeit ±1,5% rF | ±0,1°C
- 3D-Druck Elemente
- 10 SHT-Schutzhalterung
- 11 Sensoren-Halterung
- 12 Kabelsicherung
- 13 Platinen-Halterung

Objektive Wetterlagenklassifikationen

- zur Erfassung der großräumigen synoptischen Rahmenbedingungen, als einer wesentlichen Steuerungsgröße der lokalen lufthygienischen Belastungssituation
- erste Klassifikationen auf der Grundlage ständlicher ERA5-Reanalysefelder (MSLP) mittels der „objective Grosswettertypes/Circulation Prototype classification“ (Beck et al. 2007)

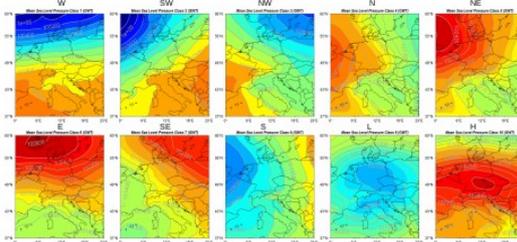


Abb. 4: Gemittelte MSLP-Felder der zehn Großwettertypes (GWT) aus der „objective Grosswettertypes/Circulation Prototype classification“ für den Zeitraum Januar 2020 bis Juli 2021.

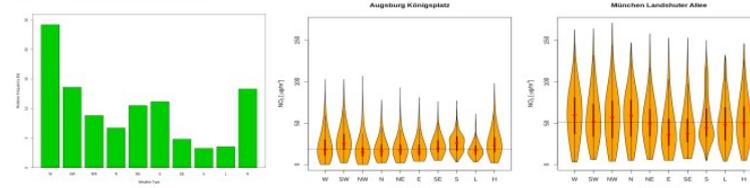


Abb. 6: Relative Auftrettsfrequenzen (%) der GWTs (links). Wetterlagespezifische NO₂-Konzentrationsverteilungen an den LÜB-Stationen Augsburg Königsplatz (mitte) und München Landshuter Allee (rechts), im Zeitraum Januar 2020 bis Juli 2021.

Literatur

Alphasense – NO₂ (2019): NO2-B43F Nitrogen Dioxide Sensor 4-Electrode. <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/NO2-B43F.pdf>

Alphasense – O₃ (2019): OX-B431 Oxidising Gas Sensor Ozone + Nitrogen Dioxide 4-Electrode. <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/OX-B431.pdf>

Beck C., J. Jacobzeit and P. D. Jones (2007): Frequency and within-type variations of large scale circulation types and their effects on low-frequency climate variability in Central Europe since 1780. *Int. J. Climatol.* 27: 473-491

Bigi A., M. Mueller, S. K. Grange, G. Ghermandi and C. Hueglin (2018): Performance of NO, NO₂ low cost sensors and three calibration approaches within a real world application. *Atmos. Meas. Tech.*, 11: 3717-3735.

Hersbach H., B. Bell, P. Berrisford, et al. (2020): The ERA5 global reanalysis. *QJR Meteorol. Soc.* 146: 1999-2049.

Philipp A., C. Beck, R. Huth and J. Jacobzeit (2016): Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software. *Int. J. Climatol.* 36: 2673-2691.

Sensirion (2021): Datasheet SHT85 Humidity and Temperature Sensor. https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customer/sensirion/Dokumente/2_Humidity_Sensors/Datasheets/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT85_Datasheet.pdf



Anhang 1-1: Posterbeitrag zum 39. Jahrestreffen des AK Klima in Passau, 5.-7.11.2021: Tagungsband (p. 45). Passau: Lehrstuhl für Physische Geographie, Universität Passau.

Abschätzung von NO₂-Konzentrationen im Umfeld eines verkehrsreichen Straßenabschnittes (München Landshuter Allee) mittels Low-Cost Messsystemen



Verena Fricke, Juan Carlos Pusch, Florian Reich, Jonathan Simon, Andreas Philipp, Christoph Beck
 University of Augsburg, Institute of Geography, Physical Geography and Climate Research, Augsburg, Germany
 christoph.beck@geo.uni-augsburg.de



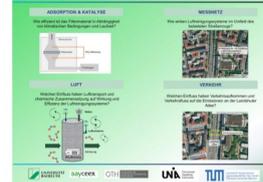
Projekthintergrund

Aktive Luftreinigungssysteme, die Schadstoffe aus der Umgebungsluft entfernen, stellen einen neuartigen technischen Lösungsansatz zur Verbesserung der lufthygienischen Situation vor allem im Umfeld stark belasteter verkehrsreicher Straßen dar. Die Wirksamkeit solcher Systeme ist bisher jedoch nicht umfassend geklärt.

Im Rahmen des vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanzierten Forschungsprojektes "REINLUFT? - Reinigen neue Luftfiltersysteme von urbanem Stickstoffdioxid?" werden neun Luftreinigungssysteme entlang der Landshuter Allee in München installiert und betrieben und deren Wirkung vor Ort, im Labor und in Simulationsstudien in vier Teilprojekten untersucht.

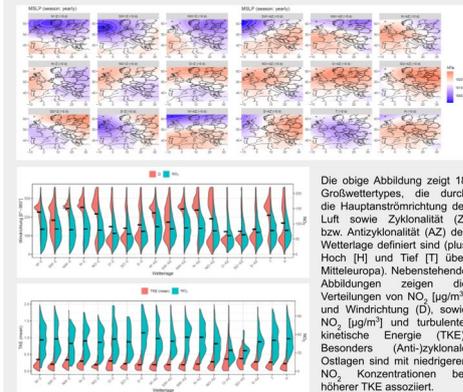
Im Teilprojekt MESSNETZ der Universität Augsburg sollen:

- die NO₂-Konzentrationen im Nahbereich und im erweiterten lokalen Umfeld der Luftreinigungssysteme, mittels „Low-Cost“ Messsystemen erfasst,
- die räumzeitliche NO₂-Variabilität analysiert und
- die lufthygienisch relevanten synoptischen Rahmenbedingungen mittels objektiver Wetterlagenklassifikationen charakterisiert werden.



Wetterlagen, lokale Meteorologie und NO₂-Konzentrationen

Erstellung von Wetterlagenkatalogen, die unterschiedliche Realisierungen von Wetterlagenklassifikationen beinhalten. Datengrundlage für jede Klassifikation waren ERA5 Reanalysedaten (Hersbach et al. 2020). Die Wetterlagen wurden mittels der cost73class Software von Philipp et al. (2010) auf Grundlage unterschiedlicher Algorithmen berechnet. Zum Einsatz kam eine Variante des k-means Algorithmus sowie die von Beck et al. (2007) entwickelten Großwettertypen (GWT; siehe Abbildung).



Low-Cost Messnetz zur Erfassung von NO₂

Aktuell sind an 19 Standorten, im erweiterten Umfeld der Luftreinigungssysteme Low-Cost Messsysteme installiert (siehe Luftbild). Die Einrichtung der Messstandorte berücksichtigt, neben der angestrebten räumlichen Verteilung der Messsysteme in variierenden Abständen zu den Filtersäulen (FS), die Realisierbarkeit einer zuverlässigen Stromversorgung, sowie die möglichst zeitnahe Genehmigungsfähigkeit durch die entsprechenden Stellen der Stadtverwaltung. Die Energieversorgung der Systeme erfolgt über die Strominfrastruktur der Stadtwerke München bzw. der FS. Drei Standorte werden derzeit autark mit Akku und Batterie betrieben. Für diese und zwei weitere noch zu installierende Standorte (auf dem westlichen Grünstreifen der Landshuter Allee) ist eine ergänzende Stromversorgung über Solarmodule geplant.



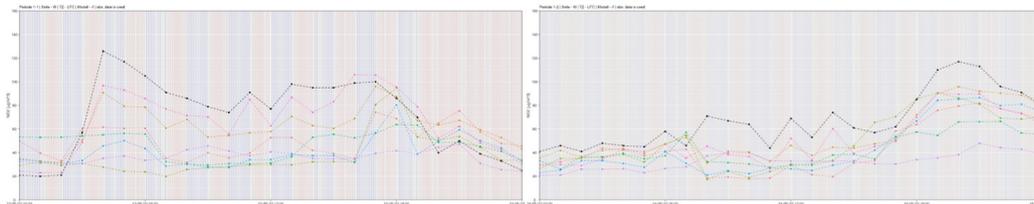
Aufbau der Messsysteme:

1. Hauptplatine: Raspberry Pi Zero W
2. Speicherkarte mit Betriebssystem: Raspberry Pi OS 32 GB
3. Energie-Regelung: 3.1 StromP 3 - Mikro USB, Wide-Range: 6V-61V 3.2 Batterie Hal - LiFePO4 1000mAh, 3.2 V
4. Datenspeicher: USB-Speicher-Stick - 128 GB
5. Verteilerplatine: Anschlüsse zwischen CPU und Sensoren (3.3V, 5V)
6. Datenübertragung (IC): Senseller Datenbus jeweils für Alpha-Sensoren
7. NO₂-Sensor: Alphasense B43F, 4-electrode, low ppb
8. O₂-Sensor: Alphasense OX-B431, 4-electrode, low ppb
9. Temperatur/Fuchte-Sensor: Sensation SHT85, Genauigkeit ±1,5% rF | ±0,1°C
10. 3D-Druck Elemente
11. SHT-Schutzhalterung
12. Kabelschichtung
13. Platinen-Halterung
14. Trockenbatterie, Weidzaunbatterie, Alkaline - 8V 200mAh
15. Akku: LiFePO4 Akku, 12.8V 18Ah 230 With BMS
16. Solar Laderegler 20A LR20ALCD mit Dual USB-Anschluss und LCD-Anzeige für 12V / 24V

Abschätzungen der NO₂-Konzentrationen aus Low-Cost Messungen

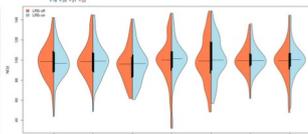
Die Abschätzung von NO₂-Konzentrationswerten erfolgt mittels statistischer Modelle, auf der Grundlage von Vergleichsmessungen, die mit den Low-Cost Messboxen an der Referenzstation des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LÜB-Station Landshuter Allee) durchgeführt wurden (1. Zeitraum: 16.06.2021 bis 21.09.2021; 2. Zeitraum: 30.05.2022 bis 18.07.2022).

Unter Verwendung der ersten Vergleichsperiode wurden verschiedene Kalibrierungsansätze, wie lineare multiple Regression, Random Forests, kombinierte lineare Regressionen mit Random Forests (Zhang et al. 2017) oder Boosting angewendet und validiert. Ein erstes Hyperparameter Tuning zeigt die Eignung nicht kombinierter und kombinierter Random Forest Modelle, die insgesamt die besten Ergebnisse erzielen.



An der LÜB-Station des LIU in der Landshuter Allee gemessene (in schwarz) und für ausgewählte Low-Cost Messboxen modellierte (varierende Farben) NO₂-Konzentrationswerte [µg/m³] für den Zeitraum 12.05. bis 15.05.2022. Vertikale blaue bzw. rote Balken indizieren Zeiträume, in denen die installierten Luftreinigungssysteme angeschaltet (blau) bzw. abgeschaltet (rot) waren.

Verteilungen modellierter NO₂-Konzentrationswerte für ausgewählte Low-Cost Messboxen, für den Zeitraum 10.05.2022 - 17.07.2022. Rot - für Zeiträume, in denen die Luftreinigungssysteme abgeschaltet waren, blau - für Zeiträume, in denen die Luftreinigungssysteme eingeschaltet waren.



Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Untersuchung der NO₂-Filterwirkung neuartiger Luftreinigungssysteme:

- wurde an der stark verkehrsbelasteten Landshuter Allee erfolgreich ein Low-Cost NO₂-Messnetz eingerichtet,
- zeigen erste Auswertungen modellierter NO₂-Konzentrationswerte – im erweiterten Umfeld der installierten Luftfilteranlagen - keine signifikante Luftreinigungswirkung.

Zur weiteren Abklärung der Reinigungswirkung - insbesondere im Nahbereich - der Filteranlagen erfolgt im weiteren Projektverlauf:

- die temporäre Konzentration des Low-Cost Messnetzes auf den Nahbereich der Luftreinigungssysteme,
- die Durchführung weiterführender Analysen der potentiellen Reinigungswirkung, unter Berücksichtigung der Wirkung spezifischer Wetterlagen und lokalmeteorologischer Rahmenbedingungen.

Literatur

Beck, C. J., Jacobell, P. D., Jones (2007) Frequency and within-type variations of large scale circulation types and their effect on low-frequency climate variability in Central Europe since 1780. Int. J. Climatol. 27, 473-491.
 Hersbach, H., S. Bell, G. Branstetter et al. (2020) The ERA5 global reanalysis. QJR Meteorol Soc. 146, 1999-2064.
 Philipp, A., Bartholy, J., Beck, C., Erikson, M., Ertel, P., Fathallah, F. S., Tymova, F. S. (2010) COST733: A European weather and climate classification. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth Planets, 35(3-5), 360-373.
 Zhang, H., Heston, S., Zhu, Z. (2017) Regression-Enhanced Random Forest. Statistics Conference Proceedings, Presentations and Poster, 9.



Anhang 1-2: Posterbeitrag zum 40. Jahrestreffen des AK Klima in Ochsenfurt, 28.-30.10.2022, Würzburg: Tagungsband (p. 26). Würzburg: Institut für Geographie und Geologie, Universität Würzburg.

Abschätzung der Wirksamkeit von Luftreinigungssystemen, im Umfeld eines verkehrsreichen Strassenabschnittes (München Landshuter Allee), mittels Low-Cost Messsystemen



Christoph Beck*, Lisa Falkenrodt, Verena Fricke, Andreas Philipp, Carlos Pusch, Florian Reich, Jonathan Simon

University of Augsburg, Institute of Geography, Physical Geography and Climate Research, Augsburg, Germany
christoph.beck@geo.uni-augsburg.de



Das Projekt - Reinigen neue Luftfiltersysteme von urbanem Stickstoffdioxid?

Im Rahmen des vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz seit November 2020 geförderten Verbund-Forschungsprojekts REINELUFT? (Reinigen neue Luftfiltersysteme von urbanem Stickstoffdioxid?) untersucht das Augsburger Teilprojekt MESSNETZ, auf der Basis von Low-Cost Messungen, die raum-zeitliche Variabilität der NO₂-Konzentrationen im Umfeld eines vielbefahrenen Abschnitts der Landshuter Allee (LA) in München.

Neben anderen Einflussgrößen (Wetterlage, lokale Meteorologie, verkehrsbedingte Emissionen) werden hierbei insbesondere auch variierende Betriebszustände von insgesamt neun – seit Herbst 2021 entlang des betrachteten Strassenabschnitts betriebenen – Luftreinigungssystemen (LRS) berücksichtigt, mit dem Ziel eine potentielle Reinigungswirkung der Filtersäulen zu quantifizieren.

Low-Cost NO₂-Messnetz

- 23 Messboxen mit Sensoren für NO₂, O₃, Temp., RH
- variierende Abstände zur LA und den LRS
- Stromversorgung durch Stadtwerke München, bei interessierten AnwohnerInnen, als autarke Standorte (Akku-Betrieb)
- 26 Standorte, in variierenden Messnetzkonfigurationen
- in der letzten Projektphase (ab Frühjahr 2023) teilweise Verdichtung des Messnetzes im unmittelbaren Umfeld einer Säule des Luftreinigungssystems
- Durchführung von Vergleichsmessungen über insgesamt 3 Referenzzeiträumen auf der Luftmessstation „Landshuter Allee“ des bayerischen Landesamts für Umwelt



NO₂-Filtersysteme

- Betrieb von neun Luftreinigungssystemen des Typs FilterCubes III von Mann+Hummel auf der Westseite der LA, ab November 2021
- Reinigungsvolumen von zusammen ca. 135.000 m³/h (aus Lärmschutzgründen tagsüber auf ca. 76 % (102.900 m³/h) und nachts auf ca. 49 % (66.400 m³/h) begrenzt)
- Wartung (Filtertausch) etwa alle sechs Wochen
- An-/Abschaltversuche mit unterschiedlichen Intervallen (im einstündigen, dreistündigen oder 24-stündigen Wechselbetrieb)

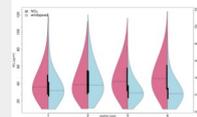


Abschätzung von NO₂-Konzentrationen aus Low-Cost Sensorwerten

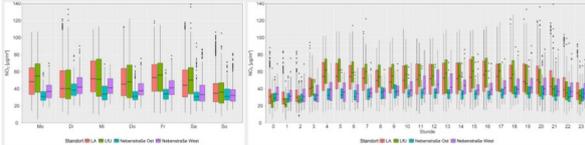
- Kalibrierung der aggregierten Low-Cost Messwerte (Stundenmittel) auf Referenz-Werte der Luftmessstation des LfU (LÜB Station Landshuter Allee)
- Ausreißereliminierung und Prädiktorscreening (Sensorwerte für NO₂, O₃, Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit als relevante Prädiktoren)
- Statistische Modelle:
 - lineare/schrittweise multiple Regression (MLR/lmStepAIC)
 - Random Forest (RF)
 - Ranger Random Forest (Ranger)
 - Radial Support Vector Machine (svmRadial)
 - Gradient Boosting (xgbTree)
- Kalibrierung und Kreuzvalidierung für 3 Kalibrierungsperioden (K1: 16.06.2021 bis 21.09.2021; K2: 30.05.2022 bis 18.07.2022; K3: 18.09.2023 - aktuell laufend)

Raumzeitliche Variabilität der NO₂-Konzentrationen

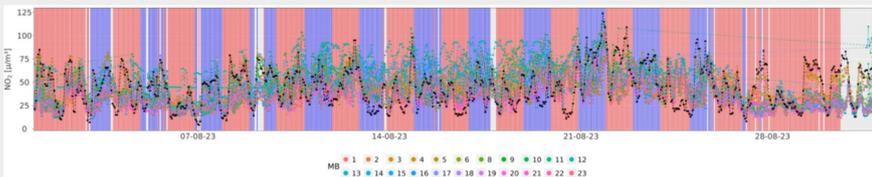
Wetterlagenspezifische (18 "Objective Großwettertypes" nach Beck et al. 2007, eingeteilt in vier Gruppen) Verteilungen der modellierten lokalen NO₂-Konzentration (stündliche Werte aller Low-Cost Messsysteme im Zeitraum Juni 2021 bis April 2023; Random Forest für Kalibrierungsperiode K2) im Umfeld der LA und der Windgeschwindigkeit (Stundenmittel an der DWD-Station München-Stadt).



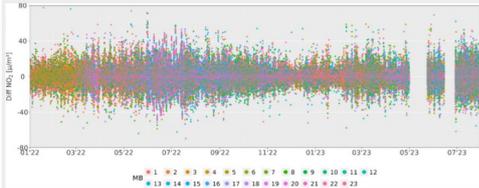
1. Wochen- bzw. Tagesgang der modellierten Stundenmittelwerte (Zeitraum 13.06.2022 bis 18.08.2023), sowie der Referenzwerte der LÜB-Station Landshuter Allee. Modellierung mit Random Forest (Kalibrierungsperiode K2).



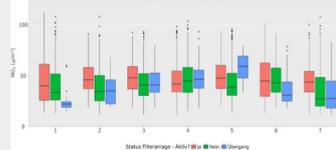
2. Modellierte Stundenmittelwerte für ausgewählte Messboxen vom 01.08.2023 bis 31.08.2023, Modellierung mit Random Forest basierend auf der 2. Kalibrierungsperiode, schwarze Linie = LfU-Daten, blauer Hintergrund = Luftreinigungssysteme an, roter Hintergrund = Luftreinigungssysteme aus.



Wirksamkeit von NO₂-Filtersystemen



Differenz der modellierten Stundenmittelwerte von der on-Stunde (Luftreinigungssysteme an) mit der vorangegangenen off-Stunde (Luftreinigungssysteme aus) vom 01.01.2022 bis 31.07.2023 für alle Messboxen (MB), Modellierung mit Random Forest basierend auf der 2. Kalibrierungsperiode.



Wochengang der modellierten Stundenmittelwerte für den August 2023, aufgeteilt nach on- und off-Status der Luftreinigungssysteme, Modellierung mit Random Forest basierend auf der 2. Kalibrierungsperiode, 1 = Montag etc.



Institut für GEOGRAPHIE

Anhang 1-3: Posterbeitrag zum 41. Jahrestreffen des AK Klima in Tübingen, 12.-14.10.2023, Geographisches Institut, Universität Tübingen.

Low-cost NO₂ measurements at an urban high traffic site in Munich, Germany



Beck C., Fricke V., Philipp A., Pusch J. C., Reich F., Simon J.

University of Augsburg, Institute of Geography, Physical Geography and Climate Science, Augsburg, Germany
christoph.beck@geo.uni-augsburg.de



Overview

Background: Active outdoor air filtering systems are a new approach towards improving air quality, in particular in places with high levels of air pollution, such as busy urban roads. However, the effectiveness of such systems is not yet comprehensively determined.

The research project REINELUFT7 ("Reinigen neue Luftfiltersysteme von urbanem Stickstoffdioxid") – funded by the Bavarian Ministry of the Environment and Consumer Protection – investigates the effectiveness of novel air filtering systems, that have been installed alongside a busy street section (Landshuter Allee) in Munich. In four subprojects (University Bayreuth, TU München, OTH Regensburg, University Augsburg) the ability of the air filtering systems to reduce NO₂-concentrations is analysed on site, in the laboratory and in simulation studies.

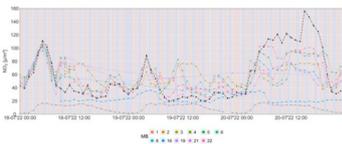
Main research goals of the subproject at the University of Augsburg are:

- installing and operating a network of low-cost NO₂-sensors alongside and in the vicinity of a heavily frequented section of the Landshuter Allee
- characterizing the synoptic situation referring to air quality by means of automated weather types classifications
- analysing spatiotemporal variations in local NO₂-concentrations, with special consideration of operating conditions of the air filtering systems

This contribution presents the monitoring network, different approaches for the field-calibration of the low-cost sensors and subsequent analyses of modelled NO₂-concentrations and preliminary analyses of the weather-type-air-quality relationship.

A network of low-cost air quality sensors comprising 20 locations is currently installed, in the extended area of air filtering systems along the Landshuter Allee (see aerial photo). Sensors used for NO₂ (B43F-4-electrode, low ppb) and O₃ (OX-B431-4-electrode, low ppb) and humidity from Sensation (SHT85).

The measurement locations represent variations in distance to the Landshuter Allee and to the installed air filtering systems and also different urban environments. Power supply, that is crucial for the continuous operation of the sensors, is provided by the power infrastructure of the Stadtwerke München or is branched off the FP. Five sites (blue) are currently operated autonomously with rechargeable batteries. Solar modules are additionally planned for supporting power supply for these sites. 4 sites (red) that have been run as Citizen Science component, will be shifted to the closer vicinity of one air filter system to enable investigations focusing on the near-distance effectiveness of the air filtering systems.



Modelled hourly values for selected sensors from 18.07.2022 to 21.07.2022. Random Forest modelling based on the second calibration period (with k-fold = 10, ntree = 10, training dataset = 0.95). grey line = traffic emissions, black line = reference data (from LRU), blue rect = air filtering systems on, red rect = air filtering systems off

Field calibrations

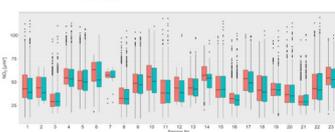
Two field calibrations have been performed based on side by side measurements with the low-cost sensors next to the calibrated reference monitoring station of the Bavarian Environment Agency (LrL, LUB station Landshuter Allee).

- First Calibration Period: 10.06.2021 - 21.06.2021
- Second Calibration Period: 30.05.2022 - 18.07.2022

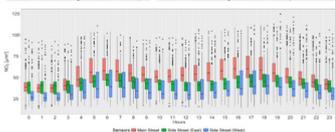
The NO₂-concentrations were estimated using various statistical models such as Multivariate Linear Regression, Random Forest, Linear Support Vector Machine and Gradient Boosting. The hyperparameters were tuned upon the calibration dataset by a 10-fold cross validation approach. Initial results show the suitability of Random Forest and Boosting which achieve the best results.



Fig. 2: RF scores for each calibration method (MLR = Multivariate Linear Regression, Ranger = Ranger- Random Forest, RF = Random Forest, svmLinear = Linear Support Vector Machine, xgbTree = Boosting) and calibration period (first and second), k-fold = 10, ntree = 10, training dataset = 0.95



1 Modelled hourly values for each sensor from 03.05.2022 to 31.01.2023, divided into on and off status of the air filter data, RF modelling based on the second calibration period (with k-fold = 10, ntree = 10, training dataset = 0.95)

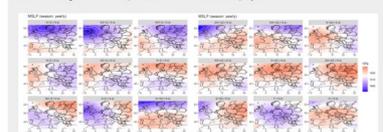


2 Modelled hourly values for three selected sensors (Main Street = Sensor Nr. 5, Side Street East = Sensor Nr. 2, Side Street West = Sensor Nr. 3) from 27.02.2023, RF modelling based on the second calibration period (with k-fold = 10, ntree = 10, training dataset = 0.95)

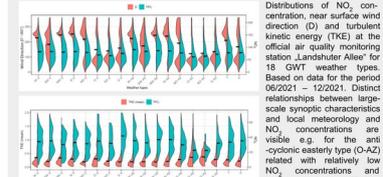
References
Beck C., J. Jendel and F. D. Jans (2007): Frequency and intensity of extreme large scale circulation types and their effects on low-frequency ozone variability. *Int. J. Climatol.* 27, 1051–1061.
Beckmann, H., and F. D. Jans (2005): The ERA-40 reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 131, 2961–2982.
Philipp A., Beck C., Fricke V., Pusch J. C., Reich F., Simon J., & J. Jans (2023): Quantitative evaluation of weather and circulation type classification. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Planetary Geosciences*, 105, 100–115.

Weather types, local meteorology and NO₂ concentrations

Based on ERA5 reanalysis data (Hensbach et al. 2020) different weather type classifications have been developed using the cost73class software (Philipp et al. 2010). Thereby different classification algorithms and input data fields have been employed.



SLP-composite patterns for 18_Großwettertypen - GWT resulting from the 'prototype classification' (Beck et al. 2007), determined for the period 06/2004-12/2021. The types are characterized through specific combinations of large-scale air flow direction (W, NW, N, ...) and cyclonicity (cyclonic = Z, anticyclonic = AZ, central cyclone/anticyclone = TR) over Central Europe.



Distributions of NO₂ concentration, near surface wind direction (D) and turbulent kinetic energy (TKE) at the official air quality monitoring station Landshuter Allee for 18_GWT weather types. Based on data for the period 06/2021 - 12/2021. Distinct relationships between large-scale synoptic characteristics and local meteorology and NO₂ concentrations are visible e.g. for the anti-cyclonic easterly type (O-AZ) related with relatively low NO₂ concentrations and increased turbulence (TKE).

Conclusions and outlook

Analyses of NO₂-concentrations derived from a low-cost monitoring network at an urban high traffic site indicate:

- the suitability of low-cost sensors in combination with statistical calibration techniques to capture spatiotemporal variations in local NO₂-concentrations
- the relevance of weather types for local meteorology and air quality
- no clear-cut effect of novel air filtering systems on NO₂-concentrations, at least in their wider area

Further investigations will focus on:

- monitoring NO₂-concentration in the close vicinity of the air filter systems
- improving the calibration of the low-cost-sensors by applying methods for drift correction and utilizing data with higher temporal (subhourly) resolution
- performing more detailed analysis of the filter effectiveness by considering variations in synoptic and local meteorological boundary conditions



Institut für GEOGRAPHIE



Anhang 1-4: Posterbeitrag zur EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 23-28 Apr 2023, EGU23-6240, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-6240>, 2023.

Anhang 2 - Info-Flyer Messboxpaten

Messzeitraum
Herbst 2021 bis Herbst 2023

Ansprechpartner
PD Dr. Christoph Beck

Kontakt
christoph.beck@geo.uni-augsburg.de

Projektpartner
Universität Augsburg
Universität Bayreuth
TU München
OTH Regensburg

Finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

Unsere Partner



Forschungsprojekt
zur Untersuchung der Luftqualität
im Bereich der Landshuter Allee
in München

 finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

 Universität
Augsburg
University

Wie gut ist die Luftqualität vor Ihrem zuhause?
Interesse an Wissenschaft?

Im Herbst 2021 stellt die Universität Augsburg im Rahmen eines vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanzierten Projektes 20 Messsysteme an der Landshuter Allee und in ausgewählten Seitenstraßen auf. Ziel ist es, die Luftqualität in diesem Bereich von München über einen längeren Zeitraum hin zu untersuchen. Insbesondere Stickstoffdioxid (NO₂) wird untersucht, welches durch das hohe Verkehrsaufkommen eine gesundheitliche Belastung für die AnwohnerInnen darstellen kann.

Wie werden die Daten ausgewertet?

Die Daten werden mit Temperatur- und Luftfeuchtedaten sowie großräumigen Wetterdaten verknüpft. Aus den Ergebnissen wird mit Hilfe von statistischen Modellen die raumzeitliche Verteilung von NO₂ für unterschiedliche Wetterbedingungen entwickelt. Es werden keinerlei persönliche Daten erhoben.



Wie können Sie helfen?

Wir suchen Patentschaften für unsere 20 Messsysteme. Die Systeme sind klein und handlich und brauchen außer Strom nichts Weiteres. Der Stromverbrauch ist dabei minimal (~ 17 kWh pro Jahr). Als Pate/Patin würden Sie für ca. 2,5 Jahre ein Messsystem z.B. außen an Ihrem Fenster, Balkon, Regenrinne oder Ähnliches anbringen lassen. Sie brauchen sonst nichts weiter zu tun. Die Messsysteme messen automatisch und zwar ausschließlich NO₂, O₃, Temperatur und relative Luftfeuchte. Von den Ergebnissen profitieren sowohl die Stadt als auch Sie selbst als AnwohnerIn.



Beispielhafte Anbringung der Messsysteme

Anhang 2-1: Informationsflyer für Anwohner und Anwohnerinnen.

Anhang 3 - Forschungsbeilage der Augsburger Allgemeinen (Februar 2022)

Seite 06

Wissenschaft und Forschung in Augsburg

Universität Augsburg

Wirklich sinnvoll oder nur heiße Luft?

Projekt untersucht, wie gut Luftreinigungssysteme gegen die Stickstoffdioxid-Belastung wirken.

Stickstoffdioxid in der Luft kann das Herz schädigen und Krankheiten wie Diabetes auslösen. Mit gravierenden Konsequenzen: Laut einer Studie des Umweltbundesamtes verloren die Deutschen 2014 statistisch betrachtet durch den Schadstoff insgesamt knapp 50.000 Lebensjahre. Eine wichtige Quelle von Stickoxiden sind Autos und Lastkraftwagen; in besonders großen Mengenquellen sie aus dem Auspuff von älteren Diesel-Fahrzeugen. Gerade die Anwohner an stark befahrenen Straßen sind daher gefährdet.

Das Gas soll zwar bereits im Motor und in der nachgeschalteten Abgasreinigung entfernt werden. Bei den Neufahrzeugen der aktuellen Abgasnorm Euro 6d funktioniert das zuverlässig. Doch bei älteren Dieselmotoren der Abgasnormen Euro 4 und Euro 5 ist dies nicht der Fall. „Einige Städte in Deutschland verfolgen daher den Ansatz, Stickstoffdioxid nachträglich aus der Luft zu entfernen“, erklärt Dr. Christoph Beck. Der Privatdozent ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Physische Geografie mit Schwerpunkt Klimaforschung. Zusammen mit Forschenden der Universität Bayreuth, der TU München und der OTH Regensburg untersucht die Augsburger Arbeitsgruppe

momentan, wie gut derartige Luftreinigungssysteme wirken. Die Forschenden konzentrieren sich dabei auf den Münchner Verkehrs hotspot, die Landshtuter Allee. Dort wurden im Rahmen des Projekts Ende letzten Jahres Filtersäulen des Herstellers Mann und Hummel installiert. Sie sind vor allem dazu gedacht, gefährlichen Feinstaub aus der Luft zu filtern. „Zusätzlich enthalten sie Aktivkohlematten, die mit ihrer großen Oberfläche Stickstoffdioxid binden und katalytisch unschädlich machen können“, erklärt Beck.

Augsburger Gruppe untersucht die Wirkung der neun Säulen

Rund 30.000 Euro Stromkosten verursachen die neun Säulen pro Jahr. Das Projekt soll die Frage beantworten, ob das Verfahren wirklich funktioniert. Vor allem interessieren sich die Forschenden dafür, wie weit räumlich sich durch die Geräte die Luftqualität bessert: Verspüht ihre reinigende Wirkung schon nach wenigen Metern? Oder lässt sie sich gar noch in den Nebenstraßen feststellen? Ist der Effekt auch noch zur Rushhour spürbar oder nur, wenn der Verkehr nachts eher spärlich fließt? Und welche Rolle spielen dabei meteorologische Faktoren wie Windrich-



Die Messboxen werden unter anderem an Straßenbäumen befestigt. Im Hintergrund ist eine Filtersäule zu sehen. Foto: Florian Reich



Montage einer Messbox an der Ostseite der Landshtuter Allee. Foto: Verena Fricke

tung und Temperatur? Um diese Fragen zu beantworten, hat die Augsburger Arbeitsgruppe eine mobile Messbox konstruiert, die sie momentan an verschiedenen Stellen rund um die Landshtuter Allee installiert. „Um Größe und Kosten gering

zu halten, setzen wir dabei auf kostengünstige Sensoren“, erklärt Beck. Diese werden zunächst mit den Werten der offiziellen Messstellen kalibriert. Das ist nicht so trivial, wie es sich anhört, denn im Gegensatz zu ihren Hightech-Pendants

wenden die Ergebnisse der Fühler von Luftfeuchte, Temperatur und Ozonkonzentration beeinflusst. „Unsere Box verfügt daher über weitere Instrumente, mit denen sich auch diese Parameter erfassen lassen“, sagt Beck. „Anhand ihrer

Messdaten können wir dann den Stickstoffdioxid-Wert korrigieren.“ Eine Reihe von Boxen sind bereits in Betrieb; einige hängen zum Beispiel bei Anwohnern von Nebenstraßen am Balkon. Sobald das Messnetz vollständ-

ig ist, wollen die Projektbeteiligten mit den eigentlichen Experimenten beginnen. So wollen sie die Reinigungssäulen teilweise ausstellen, um zu sehen, wie sich das auf die Stickstoffdioxid-Konzentration auswirkt. Forschende der TU München erfassen begleitend in einem automatisierten Verfahren Verkehrsaufkommen und den Verkehrsfluss auf der Landshtuter Allee. „Gerade der Verkehrsfluss hat auf die Emissionen der Fahrzeuge einen großen Einfluss“, sagt Beck. „Wenn wegen Staus öfter abgebremst und beschleunigt werden muss, steigen die Emissionen deutlich an. Durch die Auswertung lässt sich dabei ziemlich verlässlich abschätzen, wie viel Stickstoffdioxid gerade entsteht.“

Die Forschenden aus Bayreuth, die das Projekt koordinieren, konzentrieren sich derweil vor allem auf die kleinräumige Erfassung und die Modellierung der lokalen Wetter-Parameter, während die Beteiligten der OTH Regensburg den Katalyse-Prozess in den Reinigungssäulen genauer unter die Lupe nehmen. Das Projekt wird vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert und von der Landeshauptstadt München unterstützt; erste Ergebnisse sollen Ende 2022 vorliegen. //

Anhang 3-1: *Berichterstattung zum Forschungsprojekt in der Forschungsbeilage der Augsburger Allgemeinen (Nr. 18, Februar 2022)*