

Modellgestützte Verkehrssteuerung auf Basis großräumiger Verkehrs- und hochauflösender Luftschadstoffsimulation

Janek Laudan

Technische Universität Berlin, Kaiserin-Augusta-Allee 104-106, D-10553 Berlin,
laudan@tu-berlin.de

Dr. Sabine Banzhaf

Freie Universität Berlin, Carl-Heinrich Becker-Weg 6-10, D-12165 Berlin,
banzhaf@zedat.fu-berlin.de

Dr. Basit Khan

Arabian Center for Climate and Environmental Sciences (ACCESS), New York University
Abu Dhabi, Abu Dhabi, United Arab Emirates, basit.khan@nyu.edu,

Prof. Dr. Kai Nagel

Technische Universität Berlin, Kaiserin-Augusta-Allee 104-106, D-10553 Berlin,
nagel@vsp.tu-berlin.de

Kurzfassung

Die Reduktion verkehrsbedingter Luftschadstoffkonzentrationen erfordert das Erarbeiten geeigneter Verkehrssteuerungsmaßnahmen. Durch die Kopplung des mesoskopischen Verkehrs- und Emissionsmodells MATSim, sowie des mikroskopischen Stadtklimamodells PALM-4U, ist es möglich Verkehrsemissionen und deren Ausbreitung für große Simulationsgebiete hochauflösend zu berechnen. Darauf aufbauend wird eine geeignete Verkehrssteuerung mittels streckenabhängiger Maut zur Reduktion kritischer Luftschadstoffkonzentrationen im Tagesverlauf entworfen. Mittels Simulationsexperiment beider gekoppelter Modelle wird die entworfene Verkehrssteuerung auf verschiedene Untersuchungsgebiete angewendet und die Wirksamkeit zur Reduktion von Luftschadstoffkonzentrationen überprüft.

Förderung

Dieser Beitrag wurde teilweise durch das BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (01LP1911C) gefördert

1 Einleitung

Dauerhafte Exposition gegenüber Luftschadstoffen wie Stickoxiden und Feinstaub stellt, trotz rückläufiger Todeszahlen durch Luftverschmutzung, das wichtigste umweltbedingte Gesundheitsrisiko in der EU dar [1]. Eine Hauptquelle für anthropogene Luftverschmutzung sind verkehrsbedingte Luftschadstoffemissionen, was das Erarbeiten von Strategien zu deren Reduktion notwendig macht. Dieser Prozess kann durch die Modellierung der Wechselbeziehungen von Umweltwirkungen und Verkehrsgeschehen unterstützt werden. Grundlage zur Abschätzung der Umweltwirkungen ist die Berechnung verkehrsbedingter Luftschadstoffemissionen durch ein Verkehrsemissionsmodell, für die auf eine große Zahl etablierter Modelle zurückgegriffen werden kann [2, 3, 4].

Zur Einschätzung der Umwelt- und Gesundheitswirkung der berechneten Verkehrsemissionen ist es notwendig, die Ausbreitung von Luftschadstoffen zu modellieren. Für die Ausbreitungsmodellierung verkehrsbedingter Luftschadstoffemissionen existiert eine Vielzahl etablierter Modelle, die den Transport von Luftschadstoffen mit unterschiedlichen Detailgraden parametrisiert abbilden [5, 2, 6]. Höhere Auflösungen für die Berechnung von Luftschadstoffausbreitung können mit CFD (Computational Fluid Dynamics) Modellen erreicht werden [7, 8]. Im Gegensatz zu parametrisierten Ausbreitungsmodellen werden in CFD Modellen die strömungsmechanischen Prozesse in der Atmosphäre abgebildet, sodass der Transport von Luftschadstoffen physikalisch korrekt berechnet werden kann [9].

Durch die Kombination von Verkehrsemissions- und Ausbreitungsmodellen können Bereiche mit besonders hoher Schadstoffbelastung identifiziert werden [2, 9]. Im nachfolgenden Schritt können dann Verkehrssteuerungsmaßnahmen basierend auf vorhandenen Luftschadstoffbelastungen entworfen werden [10, 11, 12, 13]. Die Mehrzahl der betrachteten Studien verwendet aggregierte Verkehrsemissions- und parametrisierte Luftschadstoffausbreitungsmodelle, oder beschränkt sich auf kleine Simulationsgebiete, wenn mikroskopische Verkehrsemissions- und hochaufgelöste Luftschadstoffausbreitungsmodelle verwendet werden.

Die vorliegende Arbeit erweitert die vorhandenen Ansätze zum Entwurf einer luftschadstoffbasierten Verkehrssteuerung, in dem das auf mesoskopischer Auflösung operierende Verkehrs- und Emissionsmodell MATSim (Multi Agent Transport Simulation) und das hochauflösende CFD- und Luftchemiemodell PALM gekoppelt werden. Basierend auf den mittels PALM errechneten Schadstoffkonzentrationen wird eine Verkehrssteuerung zur Reduktion von Luftschadstoff-Hot-Spots entworfen und die Wirksamkeit überprüft.

2 Technische Grundlagen

2.1 MATSim – Verkehrsmodell

MATSim ist eine Open-Source-Verkehrssimulation, die Reisende als individuelle Agenten modelliert [14]. Agenten besitzen Tagespläne in Form von Aktivitäten, für deren Erfüllung

Ortsveränderungen auf einem simulierten Straßennetz durchgeführt werden müssen. Um ihren individuellen Nutzen zu maximieren, passen die simulierten Agenten, im Rahmen eines ko-evolutionären Algorithmus, ihr Verhalten an das begrenzte Verkehrsangebot an. Die Verhaltensanpassung erfolgt durch die Iteration desselben typischen Tages, wobei eine Iteration drei Schritte beinhaltet: (1) Während der Mobilitätssimulation führen die Agenten ihre individuellen Pläne aus und interagieren dabei mit anderen Agenten. Anschließend, (2) werden ausgeführte Pläne der Agenten bewertet, wobei das Ausführen von Aktivitäten einen positiven, das Verbringen von Zeit im Verkehr einen negativen Nutzen verursacht. Vor dem erneuten Start der Mobilitätssimulation, (3) erfolgt für einen Teil der Agenten eine Verhaltensanpassung durch das Erstellen neuer Pläne. Durch ausreichend viele Wiederholungen wird ein Gleichgewicht erreicht, bei dem es für einzelne Agenten nicht mehr möglich ist, ihren Nutzen zu steigern, ohne dass andere Agenten ihr Verhalten ändern.

Im Gegensatz zu mikroskopischen Verkehrssimulationen wird in MATSim auf die Berechnung komplexen Fahrzeugverhaltens verzichtet, stattdessen wird ein einfaches Warteschlangenmodell verwendet. Aufgrund des geringen Rechenaufwands für die Simulation des Verkehrsflusses ist es möglich große Simulationsszenarien zu berechnen.

2.2 MATSim – Emissionsmodell

Das MATSim-Framework enthält zur Modellierung von Verkehrsemissionen eine von Hülsmann [15] und Kickhöfer [16] entwickelte Erweiterung, die Emissionen auf Basis von Emissionsfaktoren aus der HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport) Datenbank in der Version 4.1 [17] berechnet. Bei der Auswahl von Emissionsfaktoren werden als Parameter u. a. Straßentyp, aktueller Verkehrsfluss, Fahrzeuggeschwindigkeit und Fahrzeug- und Motortyp berücksichtigt.

Die Berechnung der Verkehrsemissionen erfolgt pro Straßenabschnitt und entspricht dem Detailgrad, mit dem der Verkehr in MATSim simuliert wird. Nach dem Passieren eines Straßenabschnitts im Netz werden auf Basis der o.g. Parameter die entsprechenden Emissionsfaktoren aus der HBEFA Datenbank ausgewählt. Die Emissionsfaktoren für die verschiedenen Schadstoffe werden mit der zurückgelegten Strecke des Fahrzeugs multipliziert und in Form eines Emissions-Events gespeichert.

2.3 PALM – Dispersionsmodell

Zur Berechnung der atmosphärischen Dispersion von Verkehrsemissionen wird das PALM Model System [18] im LES (Large Eddy Simulation) Modus verwendet. Das Modell ist nicht nur in der Lage, Hindernisse wie Gebäude und Orografie aufzulösen, sondern skaliert auf Hochleistungsrechnerinfrastruktur, sodass die Simulation großer städtischer Regionen möglich ist [19]. Als Teil des PALM Model Systems ist ein Chemiemodul verfügbar, welches für die Anwendung in städtischen Umgebungen entwickelt wurde [8]. Dieses Modul bietet mehrere Luftchemie-Mechanismen sowie die Möglichkeit passive Tracer zu simulieren. Anthropogene Verschmutzung kann als Input in Form einer Chemie-Eingabedatei [18, S. 1353]

geliefert werden.

2.4 MATSim-PALM-Integration

Die Integration von MATSim und PALM erfolgt über das Chemiemodul des PALM Modells und erfordert das Konvertieren der in MATSim berechneten Verkehrsemissionen in das Chemietreiberformat von PALM. Beide Modelle verwenden unterschiedliche Datenmodelle zur räumlichen und zeitlichen Auflösung einer Simulation. So wird der Raum in MATSim in Vektordarstellung modelliert, wohingegen der in einem PALM-Szenario enthaltenen Simulationsraum in ein gleichförmiges Raster unterteilt wird, in dem jede Rasterzelle ein diskretes Volumen repräsentiert. Die Auflösung der Zeit erfolgt in MATSim in Sekundenschritten, in denen auch die Ergebnisse der Simulation gespeichert werden. Das Datenformat des PALM-Chemietreibers erfordert hingegen eine Einteilung des Simulationszeitraums in gleichförmige Zeitscheiben. Innerhalb einer Zeitscheibe wird ein konstanter Emissionsfluss in den Simulationsraum angenommen. Die beschriebene Umwandlung des Datenformats wird nach Abschluss eines MATSim Simulationslaufs mit der von Laudan [20, 21] entwickelten Methodik vorgenommen, in dem die im Event-Format vorliegenden Emissionen in das für den PALM-Chemietreiber notwendige NetCDF-Format konvertiert werden.

3 Methodik

3.1 Grundlage der Simulationsstudie

Als Verkehrs- und Emissionsmodell wird das MATSim *Open Berlin Szenario* [22, 23] verwendet. Das Modell bildet die Verkehrsnachfrage mit einer 494.107 Personen umfassenden synthetischen Bevölkerung ab, was einer 10% Stichprobe der realen Bevölkerung Berlins und Brandenburgs entspricht. Die Angebotsseite wird durch ein detailliertes Straßennetz auf Basis von OSM (OpenStreetMap) Daten abgebildet, das sämtliche Haupt- und Nebenstraßen innerhalb der Stadtgrenzen Berlins, sowie das Hauptstraßennetz in Brandenburg umfasst. Ferner ist der fahrplanbasierte ÖV (Öffentlicher Verkehr) enthalten, der auf Basis des vom VBB (Verkehrsverbund Berlin Brandenburg) bereitgestellten GTFS (General Transit Feed Specification) Fahrplans erstellt wurde. Die synthetische Modellbevölkerung kann ihr Verhalten durch das Verändern ihrer Pläne anpassen, wobei als mögliche Strategien Routenwahl, Verkehrsmittelwahl, sowie Anpassung der Abfahrtszeiten zur Verfügung stehen. Anhand des relaxierten Basisfalls werden, für das vom PALM Modell abgedeckte Gebiet, Verkehrsemissionen nach der in Kap. 2.4 beschriebenen Methodik generiert (siehe Abbildung 1a).

Für die Berechnung der Emissionsausbreitung wird ein existierendes PALM-Setup für die Berliner Innenstadt herangezogen [8, 24], welches das in rot dargestellte Quadrat in Abbildung 2a mit einer Kantenlänge von 6,7 km und einer Höhe von 3,7 km umfasst. Die Rasterauflösung des Modells beträgt 10 m in der horizontalen und vertikalen Richtung, wobei oberhalb von 2,7 km schrittweise eine gröbere Auflösung verwendet wird. Enthalten sind

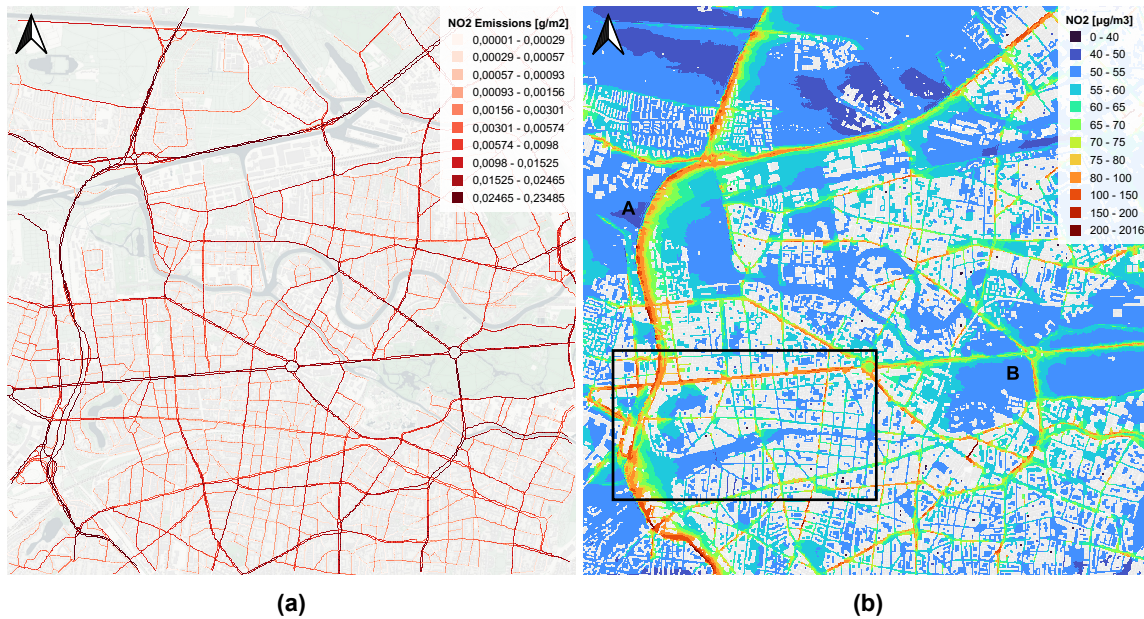


Abbildung 1: Emissionsflüsse zwischen 8 und 9 Uhr morgens (links) und daraus resultierende NO₂ Konzentrationen (rechts).

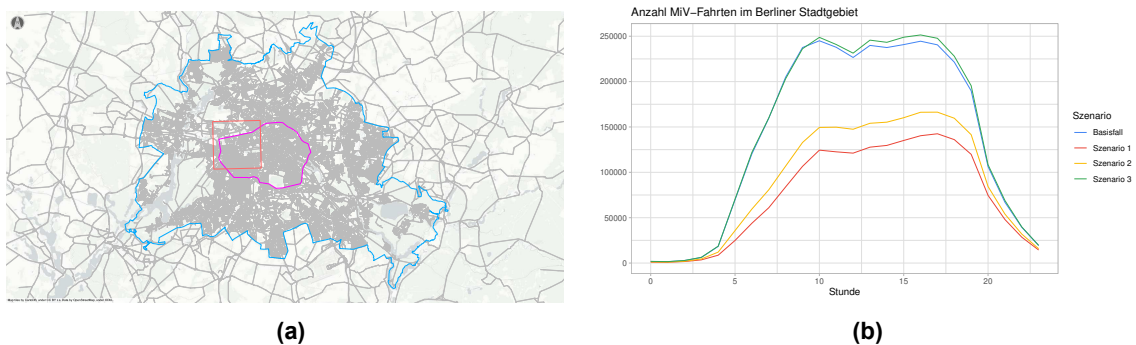


Abbildung 2: Links: Verwendete Simulationsgebiete – Berlin (blau), Berliner S-Bahn-Ring (lila), PALM-Modell (rot) Rechts: Anzahl MiV-Fahrten innerhalb der Stadtgrenzen von Berlin im Tagesverlauf differenziert nach Simulationsszenario (Erklärung in Kap. 4)

außerdem Straßentypen, Gebäudehöhen, Wasserflächen, Bodenbeschaffenheit, sowie Vegetationsdaten, die zur akkuraten Auflösung von Turbulenzen notwendig sind. Das verwendete Modell simuliert den 17. Juli 2017, der mit Temperaturen zwischen 16 und 25 °C, sowie vereinzelt Wolken und Westwind als repräsentativer Sommertag ausgewählt wurde. Das ursprüngliche PALM-Setup verwendet parametrisierte Verkehrsemissionen, basierend auf Straßentypen und eines Tagesprofils, das als Default in PALM enthalten ist.

Zur Durchführung der Studie wird auch das verwendete PALM-Setup angepasst und ein konstanter Westwind mit 1 m/s anstelle dynamischer Windbedingungen angenommen. Außerdem werden anstelle parametrisierter Verkehrsemissionen durch MATSim erzeugte Verkehrsemissionen verwendet.

Mit dem angepassten PALM-Setup wird auf Basis der in Abbildung 1a dargestellten Emissionen ein Simulationslauf zur Berechnung der Schadstoffausbreitung durchgeführt. Als Er-

gebnisformat werden im weiteren Verlauf stündlich gemittelte Konzentrationswerte aus der PALM Simulation verwendet. Die NO_2 (Stickstoffdioxid) Konzentrationsverteilung der untersten Rasterebene für die Zeitscheibe zwischen 8 und 9 Uhr morgens ist in Abbildung 1b abgebildet. Gut erkennbar ist der Verlauf stark belasteter Straßen anhand hoher NO_2 Konzentrationen, die der Verteilung der Schadstoffemissionen aus dem Chemietreiber in Abbildung 1a entsprechen.

3.2 Entwurf Verkehrssteuerung

Die ursprüngliche Idee zum Implementieren einer Verkehrssteuerung war die Identifikation von Straßenabschnitten, die zu besonders hohen Schadstoffkonzentrationen im Stadtklimamodelle führen. Diese Straßenabschnitte sollten anschließend mit einer zeit- und streckenabhängigen Maut belegt werden, um die Verkehrsmenge sowie die verursachten Schadstoffe zu reduzieren.

Für die Identifikation besonders belastender Straßenabschnitte wurde versucht, eine Korrelation zwischen von PALM simulierten Schadstoffkonzentrationen und dem simulierten Verkehrsaufkommen in der Nähe gelegener Kanten herzustellen. Hierfür wurden die von MATSim erzeugten Linienemissionen mittels Gauss' Blur nach der von Argawal [13] und Kickhöfer [25] entwickelten Methodik auf die von PALM verwendeten Rasterzellen verteilt. Die Annahme dieses Verfahrens ist, dass Straßenabschnitte in räumlicher Nähe zu einer Rasterzelle einen größeren Einfluss auf die Schadstoffkonzentration innerhalb der Rasterzelle haben, als solche, die weiter entfernt liegen.

Im Allgemeinen konnte festgestellt werden, dass eine Korrelation zwischen beiden Größen zwar vorhanden, aber nicht sehr stark ausgeprägt ist (siehe Abbildung 3). Die blaue Linie in den Punkt-Diagrammen stellt einen Linear-Fit dar, der allerdings die Realität nicht ausreichend gut beschreibt. Zu erkennen ist aber, dass es (1) eine minimale Konzentration gibt, die im Laufe des Tages schwankt und es (2) eine durchschnittliche Konzentration oberhalb des Minimums gibt, die aber unabhängig vom Verkehrsaufkommen ist. Außerdem sind (3) Ausreißer zu beobachten, die ebenfalls nicht mit dem Verkehrsaufkommen korreliert sind, die aber für Steigung des Linear-Fit verantwortlich sind. Folgende Aspekte haben einen stärkeren Einfluss auf die Schadstoffkonzentration, als die Verkehrsstärke:

1. **Layout und Streuung:** Die Einbettung der Straßen in die umgebende Topografie hat einen starken Einfluss. In Straßen, die parallel zur Windrichtung ausgerichtet sind, kann es zur Verwehung von Schadstoffen kommen, sodass niedrige Konzentrationen zu beobachten sind; bei Straßen, die orthogonal zur Windrichtung verlaufen, weist die windzugewandte Seite höhere Konzentrationen auf; an Straßen mit niedriger oder keiner Bebauung sind zu den Seiten abnehmende Konzentrationen zu beobachten.
2. **Grenzschicht:** Die Grenzschicht vergrößert sich nach Sonnenaufgang und schrumpft nach Sonnenuntergang wieder. Das bedeutet, dass Schadstoffe zu Beginn des Tages in einem viel kleineren Luftvolumen verdünnt werden als am Ende des Tages, was zu

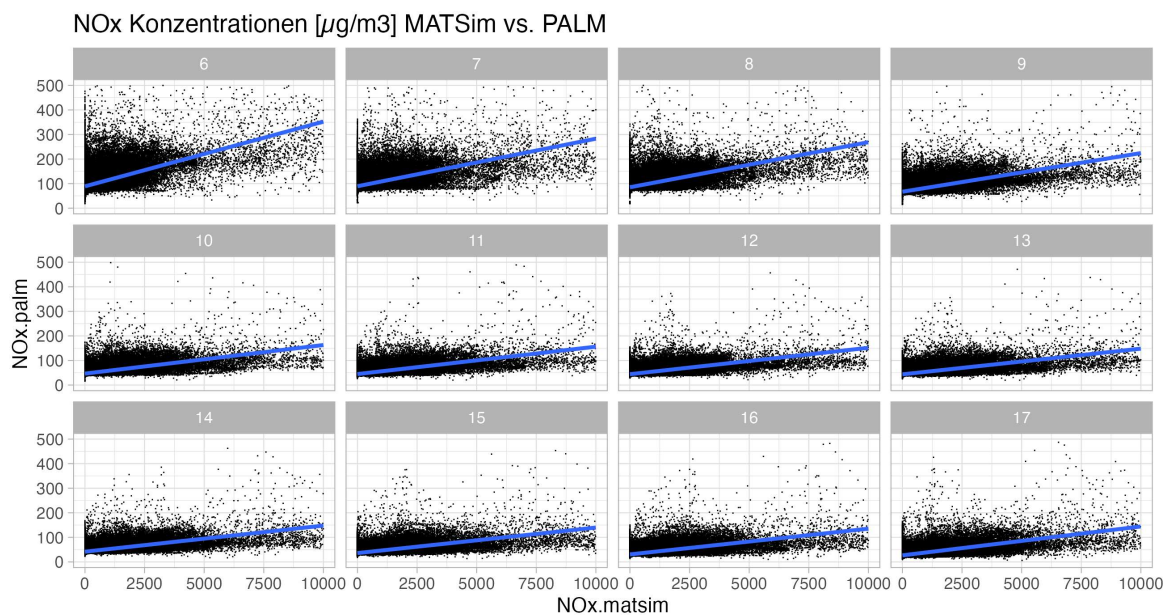


Abbildung 3: Stündliche Konzentrationen aus dem MATSim-Basisfall, verteilt auf das, für die zugehörige PALM-Simulation, verwendete Raster (x-Achse). Zum Verteilen der Emissionen wurde ein Gauss' Blur verwendet. Im Vergleich dazu stündliche Konzentrationen aus dem zugehörigen PALM-Run (y-Achse). In Blau wurde eine lineare Regressionskurve angelegt

viel höheren Konzentrationen bei gleichem Verkehrsaufkommen zu Beginn des Tages führt.

3. **Luftchemie:** Einige Schadstoffe, wie z. B. NO_2 , werden durch chemische Reaktionen in andere Stoffe umgewandelt, häufig unter Einwirkung von Sonneneinstrahlung
4. **Geometrische Artefakte:** Straßenschluchten müssen auf das PALM-Gitter abgebildet werden. Dadurch werden die glatten Wände der Straßenschluchten in stark gestufte Oberflächen umgewandelt, was bedeutet, dass die Breite der Straßenschlucht stark schwankt. Dies führt zu Artefakten auf der kleinen Skala, was Ausreißer in der Schadstoffkonzentration zur Folge hat.

Außerdem interagieren die Aspekte 1 und 4 miteinander, sodass es nicht möglich war, ein besseres Modell zur Identifikation von Straßenabschnitten zu finden, die zu erhöhten Schadstoffkonzentrationen beitragen. Die übrigen Aspekte sind nicht lokal, sondern von globaler Natur, was einen Straßenabschnitt-basierten Ansatz unplausibel macht.

In den Scatter-Plots von Abbildung 3 ist zu erkennen, dass die untere Grenze für Konzentrationen in der mit PALM simulierten Domain über den Tagesverlauf schwankt. Die gesamte Punktwolke liegt in den Morgenstunden bei höheren Werten als in der verbleibenden Tageszeit. Dieser Umstand ist auch in Abbildung 4 zu sehen, in der ein Tagesgang der Konzentrationen über das gesamte Simulationsgebiet dargestellt ist. Für Stickoxide, sowie für Feinstaub ist eine Morgenspitze erkennbar. Im Laufe des restlichen Tages sind die durchschnittlichen Werte dagegen gleichmäßiger verteilt. Aufgrund der Probleme in Bezug auf

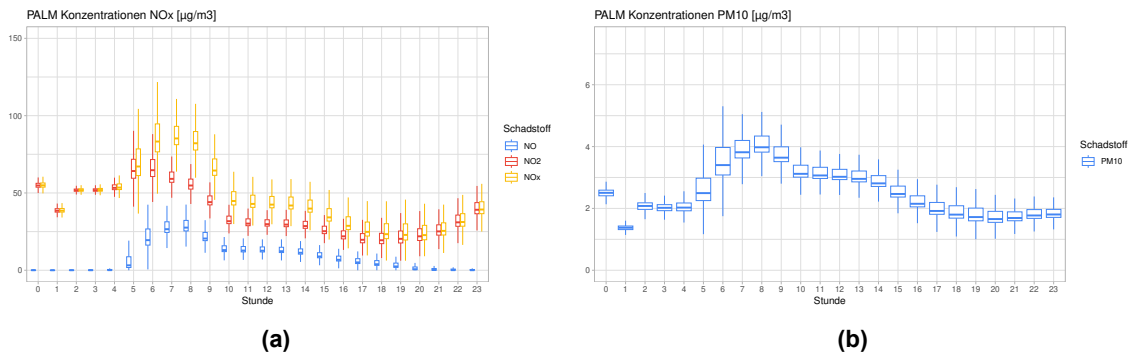


Abbildung 4: Gemittelte PALM-Schadstoffkonzentrationen innerhalb der simulierten Domain im Tagesverlauf: Links Stickoxide, rechts Feinstaub

Schadstoff	Kosten [€/kg]	Durchschn. Emissionen [g/Fzg. km]
PM10	39,6	0,002
NOx	36,8	0,338

Tabelle 1: Kostensätze für die Schadstoffe PM10 und NOx, sowie durchschnittliche Emissionen pro Fahrzeugkilometer

die räumliche Zuordnung von Emissionen wurde entschieden, ein Bepreisungsmodell zum Erheben einer Maut anhand des Konzentrationsverlaufs in Abbildung 4 zu erstellen, mit dem Ziel, die Konzentrationsspitzen in den Morgenstunden zu reduzieren.

Als Strategie zur Entschärfung von Schadstoffkonzentrationsspitzen wird eine streckenabhängige Maut implementiert, die zeitlich differenziert wird. Für jede Stunde des Tages wird basierend auf den mit PALM simulierten NO_x (Stickoxide) und PM_{10} (Feinstaub) Konzentrationsverteilungen, dargestellt in Abbildung 4, ein angepasster Wert für die Höhe der Maut ermittelt. Da die Konzentrationswerte für Feinstaub und Stickoxide sehr unterschiedlich sind, werden die beobachteten Werte normalisieren, sodass die Stunde mit dem höchsten beobachteten Wert für jeden Schadstoff den Wert 1,0 erhält. Der Gradient der normalisierten Schadstoffkonzentrationen ist in Abbildung 5a dargestellt. Der Referenzwert für Feinstaub liegt bei 8 Uhr morgens, für Stickoxide bei 6 Uhr. Zur Berechnung der Mautgebühren für die verschiedenen Tageszeiten werden die Werte aus dem PALM-Lauf mit den Schadenskosten aus van Essen [26] sowie mit den durchschnittlichen streckenbezogenen Emissionen aus HBEFA multipliziert. Tabelle 1 zeigt die während des Simulationsexperiments verwendeten Faktoren.

Mit diesen Faktoren wird nach Gleichung 1 eine entfernungsabhängige Maut für jede Schadstoffart berechnet und dann aufsummiert, um den Gesamtpreis für jede Stunde des Tages zu erhalten.

Mit den Literaturwerten aus Tabelle 1 beträgt die effektive Maut für die Spitzenstunde nur $0,0000125 \text{ €/m}$, mit niedrigeren Werten für andere Zeitabschnitte. Da zu vermuten ist, dass eine Maut in dieser Höhe nicht zu einer Verhaltensänderung der virtuellen Personen im Modell führt, werden verschiedenen Skalierungen für die erhobene Maut ausprobiert und

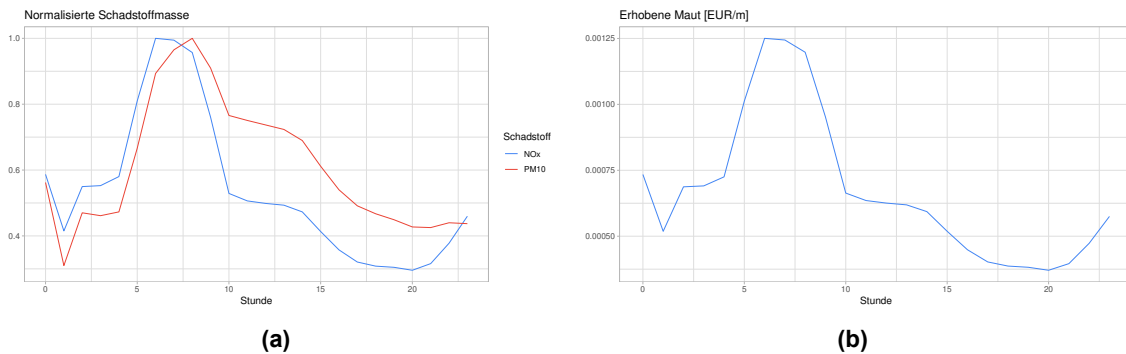


Abbildung 5: Links: Normierte Summen der Schadstoffkonzentrationen aus PALM. Rechts: Streckenabhängige Maut, resultierend aus den normierten Schadstoffsummen und Schadensfaktoren.

dementsprechend, in einer Vorstudie die Faktoren: 1, 10 und 100 getestet. Zwar sind in der Vorstudie Verhaltensänderungen für den Skalierungsfaktor 10 zu verzeichnen, um einen deutlichen Effekt für die anschließende Dispersionsmodellierung zu erzielen, werden die effektiven Mautsätze mit dem Faktor 100 skaliert, sodass sich eine Maut in Höhe von $1,25 \text{ €/km}$ für die Spitzenstunde ergibt. Der Bezug zu den Literaturwerten aus Tabelle 1 ist trotz der Skalierung wichtig, da so das Verhältnis, in dem Stickoxide und Feinstaub einen Einfluss auf die Höhe der Maut haben, gewahrt bleibt

$$C_{s,t}[\text{€/m}] = \beta_{s,t} * Schaden_s * Emission_s \quad (1)$$

Zur Überprüfung der entworfenen Methodik wird ein Simulationsexperiment durchgeführt, bei dem verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Maut-Gebieten simuliert werden. Die zeit- und streckenabhängige Maut wird für das gesamte Simulationsgebiet (Berlin und Brandenburg), das Bundesland Berlin (blauer Bereich in Abbildung 2a) und innerhalb des Berliner S-Bahn-Rings (lila Bereich in Abbildung 2a), umgesetzt.

Die vorgestellten Szenarien werden jeweils in einem MATSim-Lauf simuliert und anschließend ausgewertet. Für die Szenarien 2 und 3 werden darüber hinaus je ein weiterer PALM-Lauf durchgeführt, um die Effektivität der eingeführten Maßnahmen anhand der Veränderungen in den von PALM prognostizierten Schadstoffkonzentrationen bewerten zu können.

4 Ergebnisse und Diskussion

Nach Abschluss des Simulationsexperiments mit Verkehrs- und Schadstoffsimulation lässt sich feststellen, dass die vorgeschlagenen Maßnahmen einen Effekt auf die Anzahl der MiV (Motorisierter individual Verkehr)-Fahrten, deren räumliche Verteilung, sowie auf die daraus folgenden Schadstoffkonzentrationen haben. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Schadstoffsimulation im Sinne einer prägnanten Diskussion anhand von Stickoxiden dargestellt und auf die Darstellung der Feinstaubkonzentrationen verzichtet.

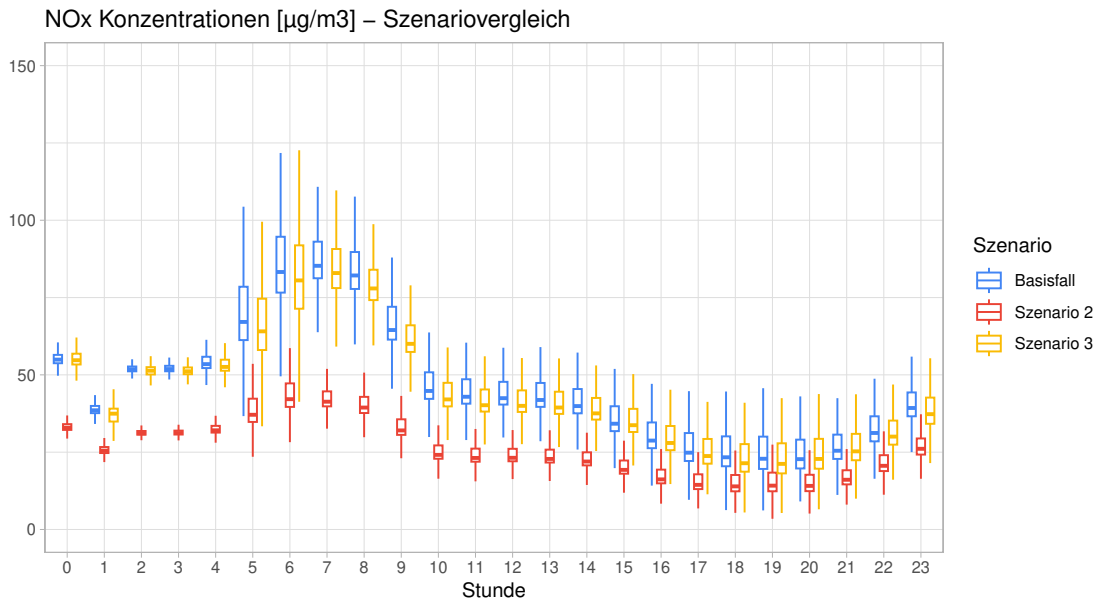


Abbildung 6: Vergleich der aggregierten NO_x Konzentrationen im Tagesverlauf differenziert nach Szenario, Box-Plot zeigt Median-Werte, 25. und 75. Perzentile, sowie 1,58 IQR als Whiskers

4.1 Szenario 1 - Maut im gesamten Simulationsgebiet

Das Erheben einer zeitabhängigen Maut im gesamten Simulationsgebiet hat einen deutlichen Effekt auf die Anzahl der MiV-Fahrten im Stadtgebiet von Berlin (blauer Bereich, Abbildung 2a). Abbildung 2b zeigt für Szenario 1 eine Halbierung der Fahrten in der Morgenspitze verglichen mit dem Basisfall. Auch für die übrigen Tagesstunden ist eine Reduktion der MiV-Fahrten zu verzeichnen, allerdings nicht so deutlich wie in den Stunden mit den höchsten Mautgebühren. Obwohl in den Abendstunden geringere Mautgebühren erhoben werden als am Morgen, ist die Anzahl MiV-Fahrten innerhalb des Stadtgebiets nur halb so hoch wie im Basisfall. Dies ist durch einen Lock-in-Effekt zu erklären, bei dem Personen, die in den Morgenstunden aufgrund hoher Preise das Auto nicht benutzen, auch am Abend das Auto nicht benutzen können, da ihr Fahrzeug im Verlauf des Tages für anschließende Fahrten nicht zur Verfügung steht.

4.2 Szenario 2 - Maut im Berliner Stadtgebiet

Auch in Szenario 2 wird, wie in Abbildung 2b dargestellt, eine deutliche Reduktion der MiV-Fahrten im Berliner Stadtgebiet erreicht. Der Effekt fällt weniger deutlich aus, als in Szenario 1, folgt aber derselben Form über den Tag, mit der größten Reduktion der Fahrten in den Stunden mit hohen Preisen und weniger starker, aber deutlicher, Reduktion der MiV-Fahrten in den Stunden mit geringeren Preisen.

Die Veränderung der MiV-Trips spiegelt sich auch in den aggregierten Schadstoffkonzentrationen im PALM-Untersuchungsraum wider. In Abbildung 6 sind mit PALM errechnete NO_x Konzentrationswerte für den Basisfall, sowie Szenario 2 und 3 dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Einführung einer Maut im gesamten Stadtgebiet zu einer deutlichen Reduktion der

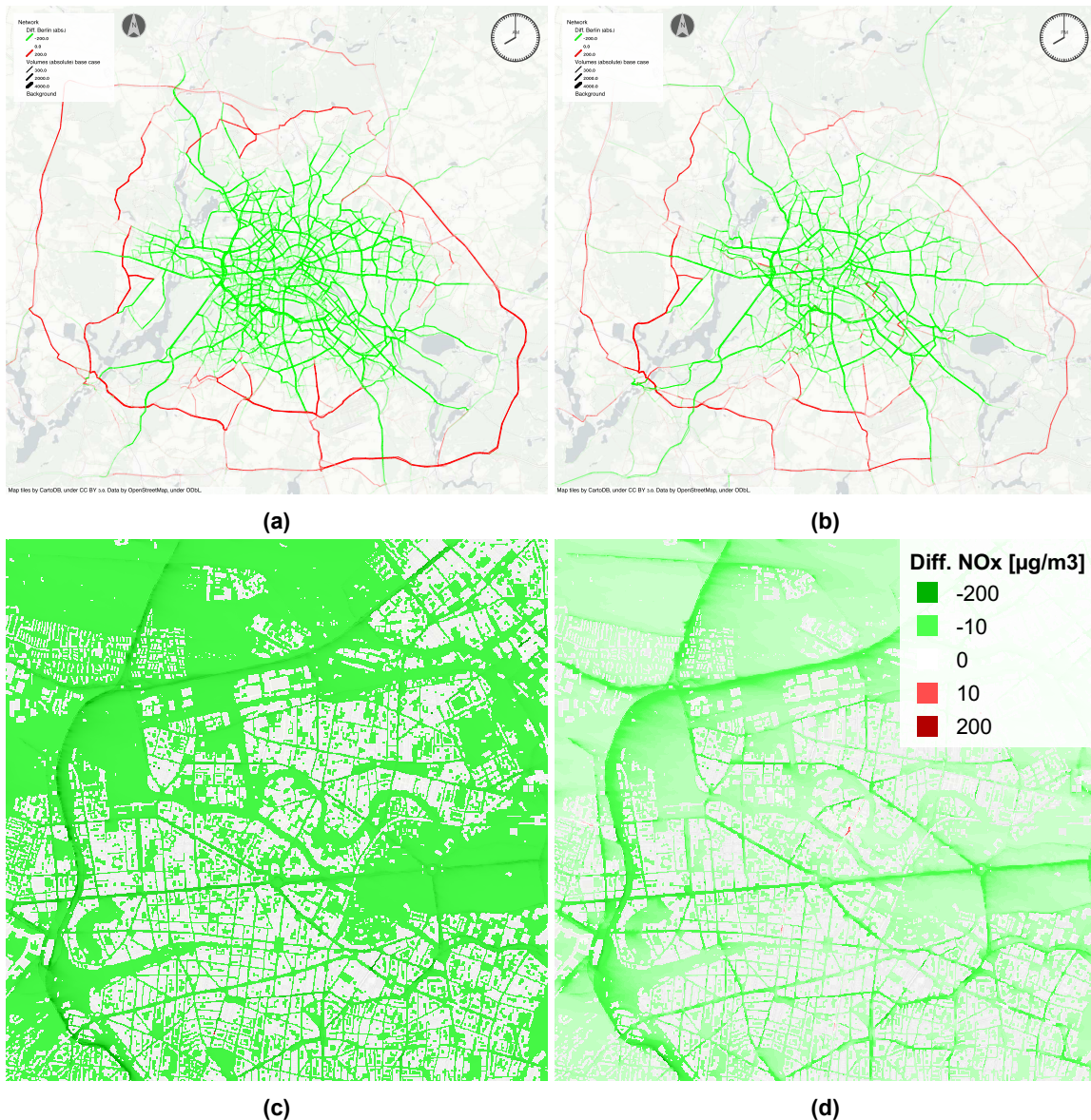


Abbildung 7: Oben: Differenz der Verkehrsbelastung um 8 (links) und um 20 Uhr (rechts) für Szenario 2. Unten: Differenzen der Schadstoffkonzentrationen um 8 (links) und um 20 Uhr (rechts) für Szenario 2

Schadstoffbelastung, insbesondere in den Morgenstunden, führt. Für Szenario 2 ist etwa eine Halbierung der mittleren Schadstoffbelastung zu verzeichnen.

Die räumliche Analyse der Verkehrsbelastung für Szenario 2 in Abbildung 7a und 7b zeigt, wie die synthetische Bevölkerung ihr Verhalten an die eingeführte Maut anpasst. Pkw-Fahrten mit Start und/oder Ziel innerhalb des Mautgebiets werden durch andere Verkehrsmittel ersetzt – hauptsächlich durch den öffentlichen Nahverkehr und das Fahrrad. Bei Fahrten durch das Mautgebiet wählen die Betroffenen Alternativrouten, zu dessen Umgehung. Dies führt zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen auf den Autobahnen im Umland von Berlin. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass der Effekt des verringerten Verkehrsaufkommens innerhalb des Mautgebiets und des erhöhten Verkehrsaufkommens auf den Umgehungsstrecken am Morgen (Abbildung 7a), wenn die Preise höher sind, stärker ist als in den

Abendstunden (Abbildung 7b).

Dieser Effekt ist auch in der Differenz der mit PALM simulierten Konzentrationswerte in Abbildung 7c und 7d erkennbar. Für das gesamte mit PALM simulierte Gebiet sind die Konzentrationen infolge der, für das Berliner Stadtgebiet, eingeführten Maut niedriger als im Basisfall. Wie beim beobachteten Pkw-Verkehrsaufkommen ist am Morgen ein stärkerer Rückgang der Schadstoffkonzentrationen zu verzeichnen als am Abend. Der stärkste Rückgang der Schadstoffkonzentrationen, erfolgt entlang der Autobahn sowie entlang von Hauptverkehrsstraßen, da diese Straßen im Basisfall die größten Emissionsverursacher sind.

4.3 Szenario 3 - Maut innerhalb des Berliner S-Bahn-Rings

Für Szenario 3, in dem die zeitabhängige Maut innerhalb des S-Bahn-Rings erhoben wird, ergibt sich nach Abbildung 2b eine erhöhte Anzahl von Pkw-Fahrten innerhalb des Stadtgebiets. Dies ist zunächst überraschend, allerdings zeigt die räumliche Analyse der Verkehrsflüsse in Abbildung 8a und 8b, dass auch in diesem Szenario die eingeführte Maut wie erwartet funktioniert. Eine mögliche Erklärung ist, dass der Modal-Share auf Basis aller Fahrten ermittelt wird, deren Luftlinie zwischen Start- und Zielcoordinate das Stadtgebiet Berlins durchqueren, sodass möglicherweise Fahrten mitgezählt werden, die das Mautgebiet umfahren.

Im Gegensatz zur höheren Zahl der MiV-Fahren innerhalb des Stadtgebiets ist für die aggregierten Emissionskonzentrationen in Abbildung 6 ein leichter Rückgang gegenüber dem Basisfall zu verzeichnen. Für Szenario 3 ist dementsprechend die räumliche Analyse des veränderten Verkehrsgeschehens, sowie der daraus folgenden Emissionskonzentrationen interessant. Abbildung 8a und 8b zeigen, dass die Verkehrsbelastung innerhalb des Mautgebiets zurückgeht und dieser Effekt für die Morgenstunden mit höheren Preisen deutlicher ist, als in den Abendstunden, in denen niedrigere Preise erhoben werden. Wie in Szenario 2 erfolgt eine Verhaltensanpassung durch Verlagerung von MiV-Fahrten um das Mautgebiet herum. Hauptausweichroute ist in Szenario 3 die Stadtautobahn A100, die direkt außerhalb des Mautgebiets verläuft und eine kapazitätsstarke Alternative für MiV-Fahrten zur Vermeidung der erhobenen Maut bietet.

Anders als im Fall des stadtweiten Mautsystems in Szenario 2, verläuft die Grenze des Mautgebiets in Szenario 3 innerhalb des PALM Simulationsgebiets. Abbildung 8c und 8d zeigen Veränderungen der NO_x -Konzentrationen in Szenario 3 verglichen mit dem Basisfall und spiegeln die Veränderung des Verkehrsgeschehens aus Abbildung 8a und 8b. Innerhalb des Maut-Gebiets kann eine allgemeine Verringerung der NO_x -Konzentrationen am Morgen (Abbildung 8c) festgestellt werden. Die außerhalb des Mautgebiets liegenden Autobahn A100 hingegen verursacht aufgrund der gestiegenen Verkehrsstärken erhöhte Konzentrationen im Vergleich zum Basis-Fall. Dieser Effekt ist am stärksten auf Abschnitten innerhalb dicht bebauter Gebiete. Aufgrund der geringeren streckenabhängigen Maut ist die Reduktion der Verkehrsbelastung innerhalb des S-Bahn-Rings in den Abendstunden



Abbildung 8: Oben: Differenz der Verkehrsbelastung um 8 (links) und um 20 Uhr (rechts) für Szenario 3. Unten: Differenzen der Schadstoffkonzentrationen um 8 (links) und um 20 Uhr (rechts) für Szenario 3

(Abbildung 8b) geringer, als in den Morgenstunden. Dies führt zu einer entsprechend weniger deutlichen Reduktion der Schadstoffkonzentrationen innerhalb des Mautgebiets (Abbildung 8d). In Verbindung mit den erhöhten Verkehrsemissionen durch die stärker benutzte Autobahn, die sich in östlicher Richtung ausbreiten, sind die beobachteten Konzentrationen im westlichen Teil des Mautgebiets daher sogar *höher* als im Basisfall.

5 Fazit & Ausblick

Die vorliegende Arbeit untersucht die Anwendung von Verkehrssteuerungsmaßnahmen basierend auf detaillierten großräumigen Luftschadstoffkonzentrationen. Auf Basis großräumig simulierter Verkehrsemissionen und daraus resultierender hochauflösender Luftschadstoffkonzentrationen unter Einbeziehung relevanter luftchemischer Reaktionen wird

eine geeignete Verkehrssteuerung mittels streckenabhängiger Maut zur Reduktion kritischer Luftschadstoffkonzentrationen im Tagesverlauf entworfen und angewendet. Durch die Kopplung des Verkehrs- und Emissionsmodells MATSim, sowie des CFD- und Luftchemie-modells PALM ist es möglich, die großräumige Ausbreitung verkehrsbedingter Luftschadstoffe in einem hohen Detailgrad zu berechnen. Weiterhin steht durch die Kopplung beider Modelle ein maßnahmensensitives und frei verfügbares Verkehrs- und Emissionsmodell zum Generieren von Input-Verkehrsemissionen für PALM-4U bereit.

Die Vermutung, dass besonders hohe Konzentrationswerte im PALM-Modell auf Straßenabschnitte mit hoher Verkehrsbelastung zurückgeführt werden können, wird in unseren Untersuchungen nicht bestätigt. Stattdessen werden, wie in Kap. 3.2 beschrieben, andere Faktoren, wie Gebäudegeometrie, oder chemische Reaktionen, als ausschlaggebend identifiziert. Zwar gibt es eine räumliche Differenzierung von Schadstoffkonzentrationen innerhalb einer Stunde, jedoch sind die Konzentrationsunterschiede zwischen den Stunden wesentlich größer. Dementsprechend wird eine Verkehrssteuerung auf Basis der allgemeinen Schadstoffkonzentrationen über den Tagesverlauf entworfen. Die so erarbeitete Bepreisung wird in einer Simulationsstudie auf verschiedene Untersuchungsräume angewandt und es kann gezeigt werden, dass durch die Anwendung einer zeitlich variierenden Maut eine Reduktion der Schadstoffbelastung innerhalb des bepreisten Gebiets erreicht werden kann. Auch der erhöhte Detailgrad der Ausbreitungsberechnung, sowie die Maßnahmensensitivität kann im Simulationsexperiment demonstriert werden. So kann bspw. gezeigt werden, dass die Wahl des Gebiets, in dem eine Verkehrssteuerung angewendet wird, für die erfolgreiche Reduktion von Schadstoffkonzentrationen ausschlaggebend ist. Aufgrund der in Kap. 4.3 beschriebenen Umfahringeffekte in Kombination mit dem von PALM simulierten Schadstofftransport ergibt sich die Situation, dass Schadstoffe in das Mautgebiet hineingeweht werden und dort erhöhte Schadstoffkonzentrationen im Vergleich zum Basisfall auftreten.

Um die ursprünglich angestrebte räumlich differenzierte Schadstoffbepreisung umzusetzen, müsste der Bereich, für die Schadstoffkonzentration vorliegen, deutlich erweitert werden. Dies könnte erreicht werden durch die Schätzung eines komplexeren parametrisierten Emissionsmodells, welches weitere Parameter wie Bebauung, Windrichtung und Tageszeit einbezieht, oder die Ausweitung des von PALM simulierten Gebiets auf das gesamte Stadtgebiet.

Auch hinsichtlich des verwendeten Detailgrads sind die Möglichkeiten, die sich aus der Kopplung von MATSim und PALM ergeben, bisher nicht ausgeschöpft. Statt zeitlich aggregierter Verkehrsemissionen, ist es möglich Fahrzeugpositionen und deren Emissionen in MATSim sekundengenau zu bestimmen und diese als Eingangsdaten für die Berechnung der Schadstoffausbreitung in PALM zu verwenden. Dieser Ansatz wird zurzeit erarbeitet.

Open Access: Sämtliche Daten zur Durchführung der Studie sind als Open Access Repository verfügbar [27]. Der Quellcode des Konvertierungstools [21], sowie der verwendete Code zum Ausführen des Berlin-Szenarios [23] sind ebenfalls öffentlich verfügbar.

Literatur

- [1] European Environment Agency. *Air Quality in Europe: 2020 Report*. en. Publications Office of the European Union, 2020. ISBN: 9789294802927.
- [2] H Forehead und N Huynh. „Review of modelling air pollution from traffic at street-level - The state of the science“. en. In: *Environ. Pollut.* 241 (Okt. 2018), S. 775–786. ISSN: 0269-7491, 1873-6424. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.06.019.
- [3] Maksymilian Mądział. „Vehicle Emission Models and Traffic Simulators: A Review“. en. In: *Energies* 16.9 (Mai 2023), S. 3941. ISSN: 1996-1073, 1996-1073. DOI: 10.3390/en16093941.
- [4] Xiaoliang Ma u. a. „An Evaluation of Microscopic Emission Models for Traffic Pollution Simulation Using On-board Measurement“. In: *Environ. Model. Assess.* 17.4 (Aug. 2012), S. 375–387. ISSN: 1420-2026, 1573-2967. DOI: 10.1007/s10666-011-9296-9.
- [5] Joel B Johnson. „An Introduction to Atmospheric Pollutant Dispersion Modelling“. en. In: *Environmental Sciences Proceedings* 19.1 (Juli 2022), S. 18. ISSN: 2673-4931, 2673-4931. DOI: 10.3390/ecas2022-12826.
- [6] Sotiris Vardoulakis u. a. „Modelling air quality in street canyons: a review“. In: *Atmos. Environ.* 37.2 (Jan. 2003), S. 155–182. ISSN: 0004-6981, 1352-2310. DOI: 10.1016/S1352-2310(02)00857-9.
- [7] Yoshihide Tominaga und Ted Stathopoulos. „Ten questions concerning modeling of near-field pollutant dispersion in the built environment“. In: *Build. Environ.* 105 (Aug. 2016), S. 390–402. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.06.027.
- [8] Basit Khan u. a. „Development of an atmospheric chemistry model coupled to the PALM model system 6.0: implementation and first applications“. In: *Geoscientific Model Development* 14.2 (2021), S. 1171–1193. DOI: 10.5194/gmd-14-1171-2021.
- [9] Mingzhang Liang u. a. „Vehicle Pollutant Dispersion in the Urban Atmospheric Environment: A Review of Mechanism, Modeling, and Application“. en. In: *Atmosphere* 14.2 (Jan. 2023), S. 279. ISSN: 2073-4433, 2073-4433. DOI: 10.3390/atmos14020279.
- [10] Shaghayegh Vosough, André de Palma und Robin Lindsey. „Pricing vehicle emissions and congestion externalities using a dynamic traffic network simulator“. In: *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 161 (Juli 2022), S. 1–24. ISSN: 0965-8564. DOI: 10.1016/j.tra.2022.04.017.
- [11] Yi Wang u. a. „Dynamic traffic assignment: A review of the methodological advances for environmentally sustainable road transportation applications“. In: *Trans. Res. Part B: Methodol.* 111 (Mai 2018), S. 370–394. ISSN: 0191-2615. DOI: 10.1016/j.trb.2018.03.011.
- [12] B Kickhöfer und K Nagel. „Towards high-resolution first-best air pollution tolls“. en. In: *Networks Spat. Econ.* 16.1 (März 2016), S. 175–198. ISSN: 1566-113X, 1572-9427. DOI: 10.1007/s11067-013-9204-8.
- [13] Amit Agarwal. *Mitigating negative transport externalities in industrialized and industrializing countries*. 2017. DOI: 10.14279/depositonce-5825.

- [14] Andreas Horni, Kai Nagel und Kay W Axhausen. *The Multi-Agent Transport Simulation Matsim*. en. Ubiquity Press, Juli 2016. ISBN: 9781909188754. DOI: 10.5334/baw.
- [15] Friederike Hülsmann u. a. *Towards a multi-agent based modeling approach for air pollutants in urban regions Entwicklung eines Ansatzes zur multi-agentenbasierten Modellierung von Luftschadstoffemissionen in urbanen Regionen*. In Conference on “Luftqualität an Straßen”, pages 144–166. Bundesanstalt für Straßenwesen, FGSV Verlag GmbH, 2011. ISBN: 9783941790773.
- [16] Benjamin Kickhöfer u. a. „Rising car user costs: comparing aggregated and geo-spatial impacts on travel demand and air pollutant emissions“. en. In: *Smart Transport Networks*. Edward Elgar Publishing, Aug. 2013, S. 180–207. DOI: 10.4337/9781782548331.00014.
- [17] Benedikt Notter u. a. *Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs*. Techn. Ber. 4.1. Sennweg 2, 3012 Bern, Switzerland: INFRAS, Aug. 2019.
- [18] Björn Maronga u. a. „Overview of the PALM model system 6.0“. en. In: *Geosci. Model Dev.* 13.3 (März 2020), S. 1335–1372. ISSN: 1991-959X, 1991-9603. DOI: 10.5194/gmd-13-1335-2020.
- [19] Björn Maronga u. a. „Development of a new urban climate model based on the model PALM – Project overview, planned work, and first achievements“. en. In: *Meteorol. Z.* 28.2 (Juni 2019), S. 105–119. ISSN: 0941-2948, 1610-1227. DOI: 10.1127/metz/2019/0909.
- [20] Janek Laudan u. a. „Coupling MATSim and the PALM Model System – Large Scale Microscopic Traffic and Emission Modelling with High Resolution Computational Fluid Dynamics Dispersion Modelling“. In: *Submitted to: Atmospheric Environment X* (2023).
- [21] Janek Laudan. *MATSim traffic emission module for PALM*. 2023. DOI: 10.5281/ZENODO.8319087.
- [22] Dominik Ziemke, Ihab Kaddoura und Kai Nagel. „The MATSim Open Berlin Scenario: A multimodal agent-based transport simulation scenario based on synthetic demand modeling and open data“. In: *Procedia Comput. Sci.* 151 (Jan. 2019), S. 870–877. ISSN: 1877-0509. DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.120.
- [23] vsp-gleich u. a. *matsim-scenarios/matsim-berlin: Mosaik-2-01*. Sep. 2023. DOI: 10.5281/zenodo.8319022.
- [24] Basit Khan. *Input data for performing chemistry coupled PALM model system 6.0 simulations with different chemical mechanisms*. Okt. 2020. DOI: 10.5281/zenodo.4153388.
- [25] Benjamin Kickhöfer. „Economic policy appraisal and heterogeneous users“. Diss. Technische Universität Berlin, 2014.
- [26] Huib van Essen u. a. *Handbook on the external costs of transport, version 2019*. Techn. Ber. 18.4K83.131. European Commission, Jan. 2019.
- [27] Janek Laudan. *Mosaik-2 Simulation Experiment*. en. Sep. 2023. DOI: 10.14279/depositonce-18737.