

Verkehrssimulation mit Emissions- und Lärmmodell

18. Oktober 2026

Einleitung

Verkehr trägt wesentlich zu städtischer Luftverschmutzung und Verkehrslärm bei. Mikroskopische Verkehrssimulationen wie SUMO ermöglichen es, Emissionen abzuschätzen und Verkehrsszenarien vor ihrer Umsetzung zu vergleichen [1, 2]. Voraussetzung dafür ist ein ausreichend kalibriertes Verkehrsmodell und eine klare Trennung zwischen modellierter Quelle und tatsächlicher Umweltbelastung.

Das Projekt erweitert das kalibriertes SUMO-Verkehrsmodell für Mannheim um Modelle für Luftschadstoffe und Verkehrslärm. Ziel war, die Simulation mit Messdaten zu vergleichen und alternative Verkehrsszenarien zu bewerten. Im Mittelpunkt stehen deshalb drei Fragen: Wie robust sind die Emissionsmodelle im Vergleich? Wo und wann entstehen modellierte Lärm-Hotspots? Welche Verkehrseingriffe verbessern die Situation in den betrachteten Zeitfenstern?

Die wichtigste Einordnung für die folgenden Ergebnisse lautet: **Das Modell eignet sich vor allem für relative Szenarienvergleiche und die Identifikation von Hotspots. Eine direkte Validierung der modellierten Emissionen mit Luftsensoren ist wegen der unterschiedlichen Messgrößen nur eingeschränkt möglich.**

Die zugrundeliegende Verkehrskalibrierung ist plausibel: Der mittlere GEH-Wert beträgt 2,77, und 88 % der Stationsstunden liegen unter GEH 5. Bei den modernen Emissionsmodellen unterscheiden sich CO₂ und NO_x um weniger als etwa 10 %. PM unterscheidet sich um den Faktor 3–4, weil HBEFA4 Reifen- und Bremsabrieb einschließt, PHEMlight dagegen im Wesentlichen Abgas-Partikel modelliert.

1. Daten und Vorgehen

Die verwendete SUMO-Modellierung folgt dem etablierten Simulationsrahmen für mikroskopische Verkehrssimulationen [1]. Die Emissionsauswertung berücksichtigt dabei die bekannte Trennung zwischen Fahrzeugquelle und tatsächlicher Umweltbelastung [2]. Die verwendeten Messquellen sind openSenseMap und Sensor.Community [5, 6]. Als Grundlage dient das bestehende, kalibrierte SUMO-Netz für Mannheim. Die Simulation berechnet Fahrzeugbewegungen sowie fahrzeugbezogene Emissionen. Für Lärm werden die Straßenabschnitte nach Tageszeit ausgewertet. Betrachtet werden Tag (06:00–18:00), Abend (18:00–22:00) und Nacht (22:00–06:00). Als Hotspots gelten jeweils die lautesten 10 % der aktiven Kanten. Die Auswertung vergleicht Mittelwert der Lärmänderung, Anteil leiserer Kanten und die Reduktion der Kanten oberhalb des jeweiligen Baseline-Schwellenwerts.

Für die Luftsensorik wurden offizielle und private Sensoren herangezogen. Nach der räumlichen Zuordnung blieben sieben Sensoren im Netz, davon einer offiziell. Ein weiterer offizieller Sensor außerhalb diente als Referenz. Die Daten wurden auf Stundenmittel aggregiert. Untersucht wurden HBEFA4, PHEMlight und PHEMlight5 sowie vier Verkehrsszenarien: Tempo 30, Nachfrage 80 %, Nacht 50 % und eine Kombination.

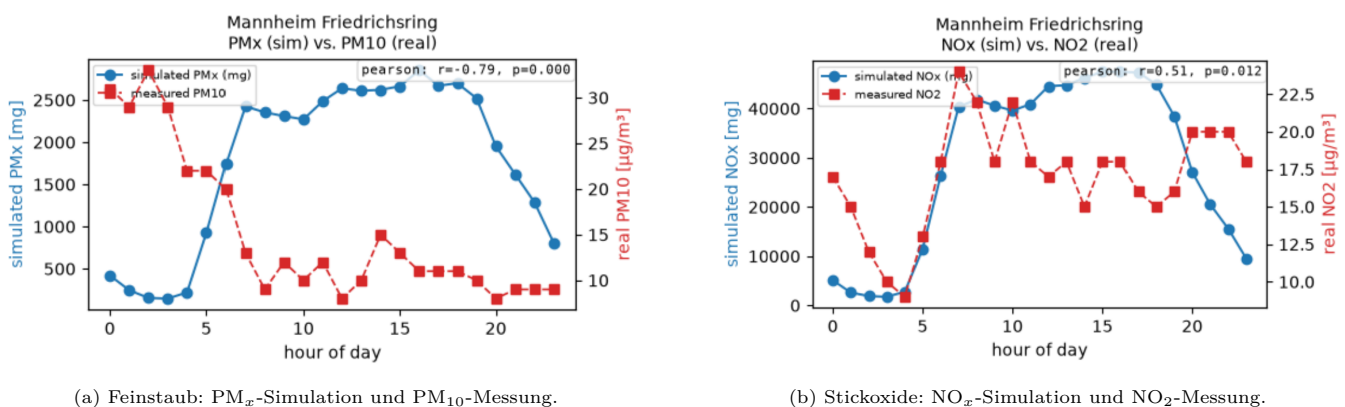


Abbildung 1: Vergleich stündlicher simulierter Fahrzeugemissionen mit Messwerten am Standort Friedrichsring. Die unterschiedliche Skalierung und die abweichenden Tagesverläufe begrenzen die direkte Validierung.

2. Ergebnisse: Emissionen

Modellvergleich. Die beiden alten HBEFA-Versionen wurden wegen deutlicher Ausreißer ausgeschlossen (HBEFA v2.1: CO₂ 29 % unter, v3.1: 34 % über HBEFA4; v3.1 zeigt zudem etwa zwölfmal so viel CO). Die drei aktuellen Modelle liefern bei CO₂ und NO_x ähnliche Werte, bei PM jedoch unterschiedliche Systemgrenzen.

Nachfrage und Kalibrierung. Die Eingabedaten beeinflussen die Ergebnisse stärker als Seeds oder die Wahl des modernen Emissionsmodells. Szenario B1 (nur Schleifen) erreicht 96,8 % GEH < 5, unterschätzt die beobachtete Nachfrage

Tabelle 1: Vergleich moderner Emissionsmodelle (Mittelwerte; Benzin-Pkw Euro 4).

Metrik	HBEFA4	PHEMlight	PHEMlight5
CO ₂ (g/Fz-km)	300	305	331
NO _x (g/Fz-km)	0,105	0,108	0,112
PM _x (g/Fz-km)	0,021	0,007	0,005
NO _x Netz (kg/Tag)	55,9	57,5	59,2

aber systematisch um 3,1 %. B2 (Schleifen plus Kameras) erhöht die Nachfrage um 52 %, die Fahrzeugkilometer um 43 % und CO₂ um 58 %. Nahe dem Innenstadtring verschlechtert sich die Passung. B4 reduziert durch eine Optimierung über drei Stunden den absoluten Zählfehler um 66 % und erreicht ARE 0,071 sowie NRMSE 0,103.

Sensorvergleich. Abbildung 1 zeigt, dass sich die Erwartung einer direkten Korrelation für Feinstaub nicht bestätigt: Verkehr erklärt nur ungefähr 20 % der gemessenen Feinstaubbelastung. Wetter, atmosphärische Durchmischung, Wohnen und Landwirtschaft haben ebenfalls große aktuell unbekannte Einflüsse. Bei NO_x ist die Korrelation positiv, die Tagesverläufe bleiben jedoch strukturell verschieden. Sensorhöhe, Abstand zur Straße, Kalibrierung und Sensortyp sind teilweise unbekannt und erschweren eine genauere Interpretation und Validierung der Ergebnisse.

3. Ergebnisse: Lärm und Szenarien

Die zeitliche Aggregation orientiert sich an Tages-, Abend- und Nachtfenstern der Umgebungslärmbewertung. Sie ist jedoch keine vollständige Berechnung der offiziellen L_{den} - oder L_{night} -Indikatoren [3, 4]. Insgesamt wurden 368 unterschiedliche Hotspot-Kanten gefunden. Abbildung 2 zeigt ihre räumliche Verteilung: 333 liegen am Tag, 327 am Abend und 321 in der Nacht über dem jeweiligen Schwellenwert. 284 Kanten (77,2 %) sind in allen drei Zeitfenstern Hotspots. Die lauteste Straße ist durchgehend die Kurt-Schumacher-Brücke (82,9 dB Tag, 81,1 dB Abend, 76,6 dB Nacht). Sie liegt in jedem Fenster etwa 8 dB über dem zweitplatzierten Abschnitt.

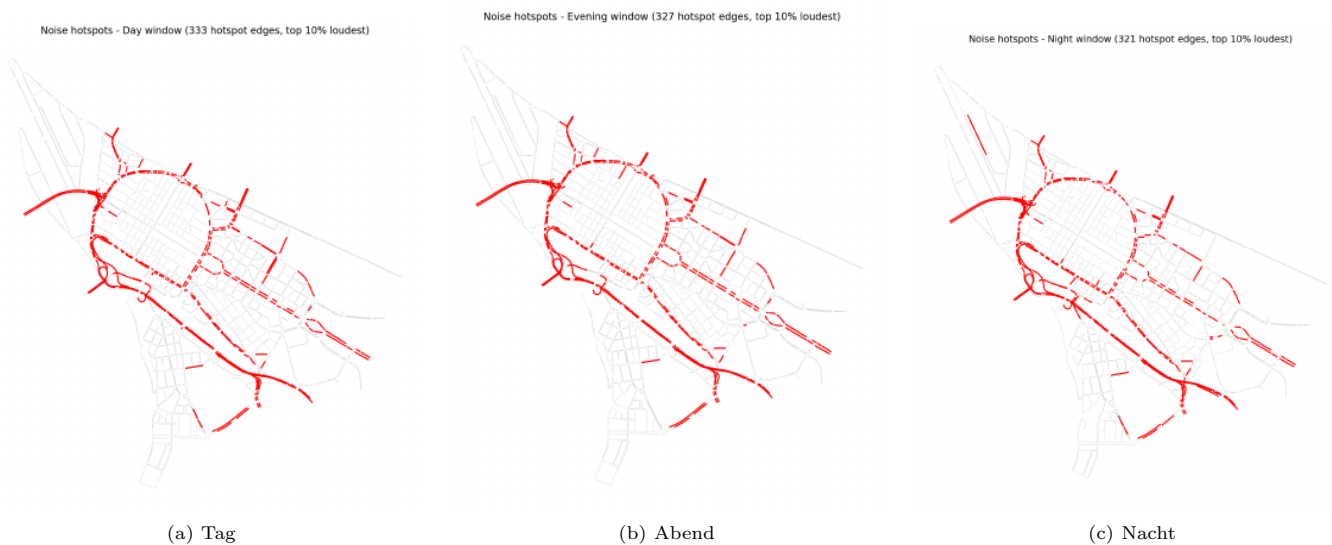


Abbildung 2: Räumliche Verteilung der jeweils lautesten 10 % der Straßenabschnitte. Die Tages- und Abendkarten ähneln sich stark. Die Nacht zeigt einige abweichende Hotspots.

Tabelle 2: Lärmänderung gegenüber der Baseline: Mittelwert in dB / Hotspot-Reduktion.

Szenario	Tag	Abend	Nacht
Tempo 30	0,52 / 22,5%	0,45 / 18,4%	0,90 / 30,5%
Nachfrage 80	0,89 / 15,0%	0,94 / 17,1%	0,58 / 17,1%
Nacht 50	0,02 / 0,9%	-0,04 / -0,6%	1,72 / 47,4%
Kombiniert	1,57 / 41,7%	1,68 / 43,7%	1,50 / 43,3%

Die Szenarien verfolgen unterschiedliche Ziele. Abbildung 3 fasst die drei Vergleichsmetriken zusammen. **Nacht 50** ist für eine zeitlich gezielte Nachtentlastung am wirksamsten. **Nachfrage 80** macht tagsüber den größten Anteil der Kanten leiser (88,9 %), erzielt aber geringere Schwellen-Hotspot-Reduktionen. **Tempo 30** reduziert Hotspots moderat und flächiger. **Kombiniert** liefert die konsistenteste netzweite Verbesserung, ist aber nicht in jedem Einzelkriterium führend. Die räumliche Verteilung ist daher ebenso wichtig wie der Durchschnittswert.

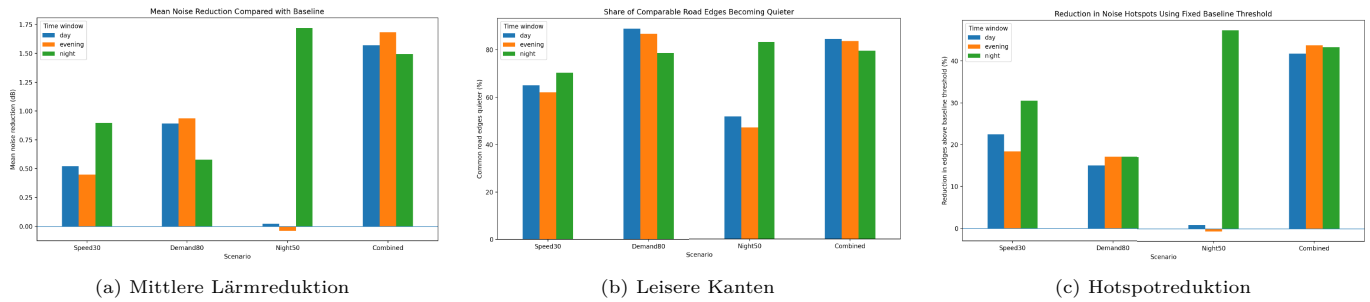


Abbildung 3: Vergleich der vier Szenarien gegenüber der Baseline in den drei Zeitfenstern. Die Metriken messen Größe, räumliche Reichweite und Schwellenwert-Überschreitungen der Lärmreduktion.

4. Web-App

Die Web-App bildet den kompletten Analysezyklus ab: Szenario bearbeiten, Simulationen mit reproduzierbaren Parametern starten, Ergebnisse prüfen und Varianten anhand gemeinsamer Kennzahlen vergleichen. Dadurch werden die Szenarien auch für Verkehrs-, Mobilitäts- und Umweltplaner zugänglich, die nicht direkt mit SUMO-Dateien arbeiten, wie in Abbildung 4 dargestellt.

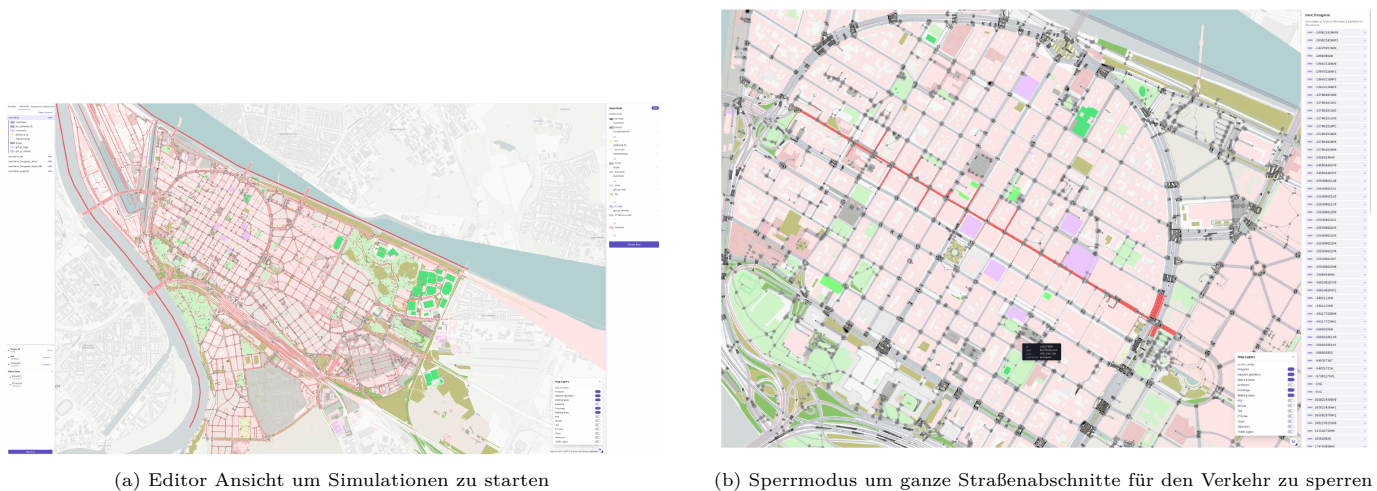


Abbildung 4: Darstellungen der Oberfläche der implementierten Webapp.

Policies wie Tempo 30 können auf eine Simulation angewendet werden, ohne Netzdateien manuell zu bearbeiten. Kartenansichten, Hotspot-Overlays und Dashboards für CO_2 , NO_x , Feinstaub und Lärm unterstützen die räumliche Priorisierung. Die asynchrone Ausführung verhindert, dass lange Simulationen die Bedienoberfläche blockieren. Die CLI, Docker-Compose und Helm-Chart erleichtern die Automatisierung, lokale Entwicklung und den Cloud-Betrieb.

Kernaussagen, Grenzen und Empfehlungen

Die Ergebnisse sind unter Berücksichtigung der methodischen Grenzen die die Emissionssimulation in SUMO erlaubt zu interpretieren. Die Simulation eignet sich insbesondere für relative Vergleiche und zur Priorisierung von Straßenabschnitten, sollte jedoch nicht als Grundlage für absolute Vorhersagen verstanden werden. Vor Simulationen für einzelne Tage sind die Qualität der Verkehrsdaten und die Abdeckung durch Sensoren zu überprüfen. Für belastbarere Umweltbewertungen sind weiterführende Modellierungen erforderlich: eine Luftschadstoffmodellierung unter Einbeziehung meteorologischer Bedingungen und Hintergrundbelastungen, eine Schallmodellierung nach CNOSSOS-EU unter Berücksichtigung von Gebäude- und Bevölkerungsdaten sowie eine differenziertere Abbildung der Fahrzeugtypen. Darüber hinaus sollten mehrere Tage als Datengrundlage berücksichtigt werden, um die Robustheit der Ergebnisse zu bewerten.

Insgesamt bietet das Mannheim-Modell eine belastbare technische Grundlage für reproduzierbare Was-wäre-wenn-Analysen und den systematischen Vergleich verkehrlicher Maßnahmen. Der wesentliche Mehrwert liegt dabei weniger in einzelnen absoluten Emissions- oder Lärmwerten als vielmehr in der vergleichenden Bewertung der Interventionen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass zeitlich gezielte Maßnahmen in bestimmten Perioden eine deutliche Entlastung bewirken können, während kombinierte Maßnahmen eine gleichmäßigere Verbesserung über das Straßennetz hinweg ermöglichen.

Literatur

- [1] P. Alvarez Lopez et al.: *Simulation of Urban Mobility (SUMO)*. Zenodo, Juni 2026.
- [2] E. Irankunda, Z. Török und N. Ajtai: Air Pollution Caused by Urban Transport: Meteorology and Downwind Dispersion of Near-Road Traffic Exhaust and Non-Exhaust Emissions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 237(3), 137, 2025.
- [3] European Commission: Commission Directive (EU) 2015/996 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC, 2015.
- [4] Bundesministerium für Umwelt und Bundesministerium für Verkehr: Bekanntmachung der Berechnungsverfahren für den Umgebungslärm nach § 5 der 34. BImSchV, Anlage 1 (BUB), 2021.
- [5] senseBox Project, Institute for Geoinformatics, University of Münster: openSenseMap measurement archive. <https://archive.opensensemap.org/>, Daten zu Stundenmitteln aggregiert.
- [6] Sensor.Community: Messdatenplattform. <https://api-rrd.madavi.de:3000/grafana>.
- [7] Copernicus Climate Change Service: ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present, 2018.
- [8] E. Bocher et al.: NoiseModelling: An Open Source GIS Based Tool to Produce Environmental Noise Maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), 130, 2019.