

Monitoring der Luftqualität für ein umweltsensitives Verkehrsmanagement in der Pilotregion Leipzig: Einblicke aus dem Forschungsprojekt AIAMO

Timo Houben^{1,2}, Elmar Brockfeld³, Ema Vosgerau^{1,2}, Jan Bumberger^{1,2},
Thomas Trabert^{1,2}



Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, Leipzig

¹ Research Data Management

² Department Monitoring- und Erkundungstechnologien
Permoserstraße 15, 04318 Leipzig

³ **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt**

Institut für Verkehrssystemtechnik
Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin



Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	3
1 AIAMO – ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MOBILITY	4
2 PILOTREGION LEIPZIG	5
3 UMWELT- UND VERKEHRSDATEN	8
3.1 MESSUNGEN DER LUFTQUALITÄT	8
3.2 PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG UND QUALITÄTSKONTROLLE DER UMWELTDATEN.....	9
3.3 VERKEHRSDETEKTOREN	11
4 KORRELATION: LUFTQUALITÄT UND VERKEHR	14
4.1 TYPISCHER WOCHENVERLAUF	14
4.2 EREIGNISBEZOGENE ANALYSE.....	15
5 FAZIT UND AUSBLICK	17
LITERATUR	18



Kurzfassung

AIAMO (Artificial Intelligence and Mobility) ist ein Forschungsprojekt vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) mit einem Fördervolumen von 16,7 Mio. €, das darauf abzielt, durch sektorenübergreifende Vernetzung der Mobilitätsträger eine datensouveräne, KI-basierte Mobilitätssteuerung für Städte zu entwickeln. Seit Juli 2023 erarbeiten 13 Partner aus Forschung und Wirtschaft gemeinsam an Lösungen und Maßnahmen zur Ermöglichung eines umweltsensitiven Mobilitätsmanagements. Ziel ist es, durch vereinfachte Datenerhebung und den Einsatz von KI ressourcenschonende, sichere und effiziente Mobilitätslösungen zu gestalten. Mithilfe von KI sollen Emissionen reduziert, multimodale Mobilitätsangebote gefördert und Verkehrsprognosen sowie Reaktionen auf Überlastungen und Grenzwertüberschreitungen optimiert werden. Eine der zentralen Herausforderungen besteht darin, verlässliche Mobilitätsangebote sicherzustellen und dabei die Einhaltung von Klimazielen zu forcieren. Bisher fehlt jedoch ein zugängliches Konzept zur Vernetzung verschiedener Mobilitätsdienste, welches besonders für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU), Kommunen und kleinere Städte integrierte Lösungen sowie eine niedrige Einstiegshürde bietet. Zudem gibt es derzeit noch keinen Einsatz von KI im umweltsensitiven Mobilitätsmanagement.

Zur Erreichung der Ziele werden im Projekt digitale Zwillinge für die Bereiche Verkehr und Umwelt geschaffen, welche das aktuelle urbane Geschehen in Echtzeit widerspiegeln. Sie dienen als Grundlage für Modellprognosen, welche helfen sollen, die Auswirkungen von Verkehrsmanagementmaßnahmen aufzuzeigen und somit zur Entscheidungsunterstützung im taktischen und operativen Betrieb dienen. Das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) koordiniert dabei die Planung und Umsetzung eines Umweltmessnetzes in der Pilotregion Leipzig zur urbanen Luftqualität, um verkehrsbedingte Emissionen zu überwachen. Die generierten Daten werden im Zeitreihenökosystem des UFZ auf Plausibilität geprüft, einer automatischen Qualitätskontrolle mit Hilfe der am UFZ entwickelten Software (SaQC – System for Automated Quality Control, Schmidt et al, 2023) unterzogen und im Anschluss zur Analyse und Prognose weiterverarbeitet sowie veredelt. Ziel ist die Erstellung einer automatischen, reproduzierbaren und standardisierten Qualitätskontrolle für Zeitreihendaten. Das Umweltmessnetz in Leipzig umfasst aktuell 10 Luftqualitätssensoren, welche Stickoxide (insbesondere NO_2) und Feinstaub (PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$) messen.

Im weiteren Verlauf des Projektes werden bis zu 50 Sensoren in der Pilotregion Leipzig installiert. Die Messungen werden dabei in einem Untersuchungsgebiet von 6x6 km durchgeführt und beinhalten sowohl verkehrsnaher als auch Hintergrundmessungen (z.B. in Parks). Die ersten Auswertungen zeigen deutliche Tagesmuster bei den Stickstoffdioxid-Konzentrationen (NO_2), mit Spitzenwerten während der Rushhour und den niedrigsten Werten zur Mittagszeit. Zudem wurden signifikante Anstiege während großer Veranstaltungen, wie EM-Spielen und Konzerten, festgestellt, bei denen die NO_2 -Konzentrationen um bis zu 20 % über dem Normalwert lagen. Höchstwerte wurden im Stadtzentrum gemessen. Ähnliche Trends sind bei den Feinstaubmessungen (PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$) zu beobachten, wobei ebenfalls Spitzenwerte während der Rushhour und bei (Groß-)Veranstaltungen auftraten. Die Analyse der NO_2 -Mittelwerte über einen Zeitraum von zwei Monaten zeigt, dass der Jahresgrenzwert in einigen Fällen überschritten oder knapp erreicht wurde. Im Hinblick auf die ab 2030 geltende EU-Luftqualitätsrichtlinie, die einen Jahresmittelwert von maximal $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für NO_2 vorsieht, wird der aktuell geltende Grenzwert halbiert. Auch die Grenzwerte für PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$ werden zukünftig gesenkt, was zu einer erhöhten Anzahl an Messstationen führen könnte, die Grenzwertüberschreitungen dokumentieren (Umweltbundesamt, 2024).

Diese Entwicklungen verdeutlichen die Dringlichkeit des Projektes AIAMO und dessen Bedeutung für die Mobilitätswende. In den kommenden Monaten werden alle Luftqualitätssensoren installiert, der automatisierte Prozess zur Qualitätssicherung von Zeitreihendaten implementiert sowie die Bewertung der Modellergebnisse durchgeführt, zur Ableitung verkehrsoptimierender Maßnahmen, insbesondere für den öffentlichen Nahverkehr.

1 AIAMO – Artificial Intelligence and Mobility

Das Forschungsprojekt AIAMO (Artificial Intelligence and Mobility), gefördert durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) mit 16,7 Mio. €, entwickelt sektorenübergreifende, KI-basierte Lösungen für eine datensouveräne Mobilitätssteuerung in Städten. Seit Juli 2023 arbeiten 13 Partner aus Forschung und Wirtschaft daran, umweltsensitive, multimodale Mobilitätslösungen zu schaffen, sodass Emissionen des Straßenverkehrs reduziert werden und die Luftqualität verbessert wird. Langfristig wird sich dies auf die Gesundheit der in der Stadt lebenden Bevölkerung auswirken, damit die Lebensqualität verbessert und die Lebenserwartung erhöht. Weiterhin wird durch eine effiziente Verkehrsprognose und -steuerung ein Beitrag zum globalen Klimaschutz und Einhaltung der Klimaschutzziele (UNFCCC, 2015) geleistet.

Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Vernetzung von Mobilitätsdiensten, insbesondere für KMU, Kommunen und kleinere Städte, sowie auf der Entwicklung integrierter Konzepte mit niedrigen Einstiegshürden. Für die Pilotregion Leipzig wird der Aufbau eines hochskalierbaren Umweltmessnetzes und der entsprechenden Datenanalyse für einen digitalen Zwilling vorangetrieben. Dies unterstützt die Kommune dabei, fundierte Maßnahmen zur Verbesserung von Luftqualität und Verkehr zu ergreifen und mittelfristig die Grenzwerte des ab dem Jahr 2030 geltenden Luftqualitätsstandards der europäischen Kommission (EU-Kommission, 2024) einzuhalten.

Innerhalb dieses Beitrags wird der gegenwärtige Stand der Sensorinstallationen in der Pilotregion vorgestellt. Dabei zeigt sich das zielführende Zusammenspiel der Konsortialpartner mit der Kommune. Im folgenden Abschnitt werden Einblicke in Messdaten der Luftqualität gegeben. Hierbei wird das am UFZ entwickelte Tool SaQC (System for automated Quality Control, Schmidt et al, 2023) zur Qualitätssicherung von Luftqualitätsdaten vorgestellt.

Darüber hinaus wurde begonnen, die erhobenen Umweltdaten mit Verkehrsdaten (Detektordaten) zu korrelieren, um das Zusammenspiel beider Datensätze für ereignisbezogene Szenarien zu analysieren. Dies ermöglicht sowohl Rückschlüsse auf die Wechselwirkungen zwischen Verkehr und Umwelt als auch die Ableitung zielgerichteter Maßnahmen für die Kommune.

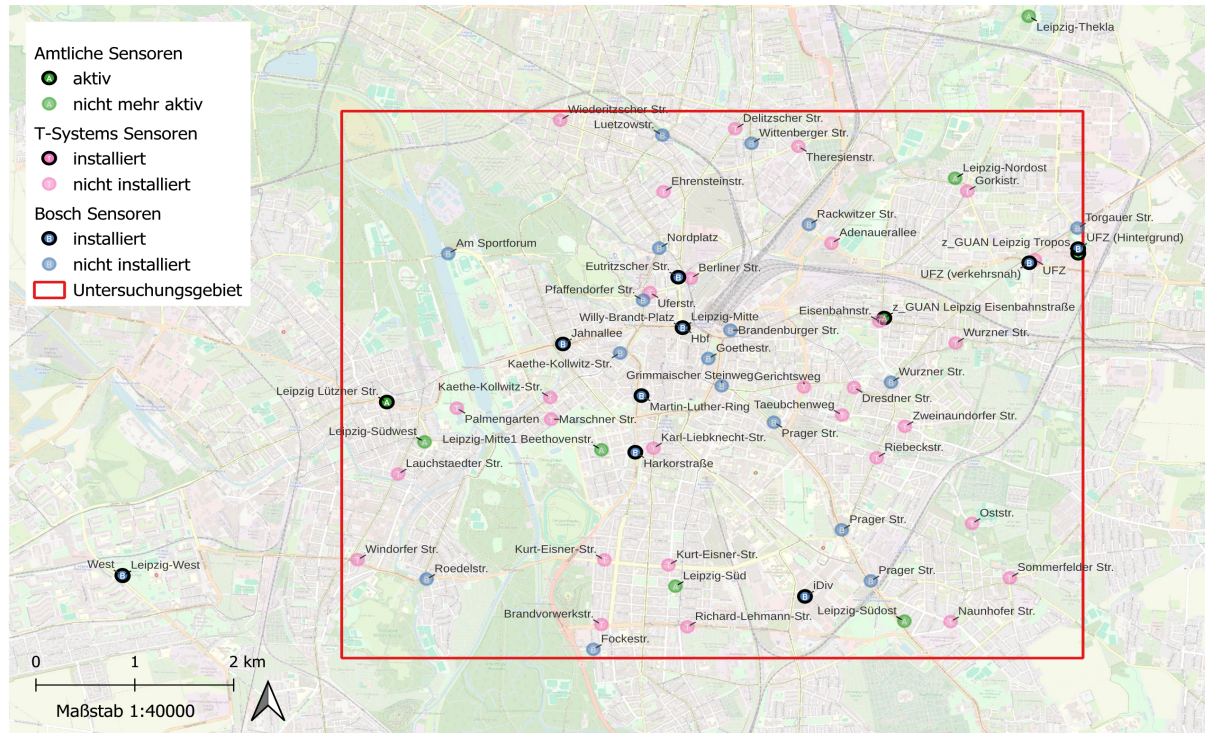
2 Pilotregion Leipzig

Die übergeordneten Ziele der Leipzig-Strategie 2035 und des Integrierten Stadtentwicklungskonzepts (INSEK) werden im Projekt AIAMO unmittelbar adressiert. Schwerpunkte der Stadt Leipzig sind ein nachhaltiges Wachstum, die Erreichung der Klimaneutralität bis 2040, die Förderung umweltfreundlicher Mobilität, der Schutz und die Weiterentwicklung von Grünflächen sowie eine effiziente, digitalisierte Verwaltung. Im Zentrum steht eine ausgewogene ökologische, soziale und wirtschaftliche Entwicklung, die die Lebensqualität aller Bürgerinnen und Bürger verbessert (City of Leipzig, 2024). Als eine der Pilotregionen bildet Leipzig einen zentralen Baustein im Forschungsprojekt AIAMO, dessen Erkenntnisse und Erfolge als Vorbild für andere Städte dienen sollen.

Im ersten Schritt wurde für die Pilotregion Leipzig ein umfassendes Konzept zur Positionierung und Bestimmung von Messstandorten der Luftqualität entwickelt, welches als Grundlage für die Analyse von Umweltdaten dient. In enger Abstimmung mit verschiedenen Ämtern der Stadt Leipzig wurde ein Entwurf zur Platzierung der Messstationen im Kerngebiet der Stadt erarbeitet. Die Auswahl der Standorte orientierte sich an lufthygienisch relevanten Hot Spots, die aktuell oder perspektivisch Grenzwertüberschreitungen der Luftqualität (insbesondere Feinstaub und Stickstoffdioxid) aufweisen könnten. Dabei wurden sowohl verkehrsnaher Bereiche mit hoher Verkehrsbelastung als auch städtische Hintergrundgebiete wie beispielsweise Parks berücksichtigt. Die Standortwahl erfolgte dabei in einem iterativen Vorgehen mit allen relevanten Stakeholdern und unter Berücksichtigung infrastruktureller Gegebenheiten wie Baustellen, Befestigungsmöglichkeiten und der Stromversorgung der Sensoren. Hierbei diente als Basis die Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen (39. BImSchV), welche spezifische Anforderungen an die Auswahl von Messorten definiert.

Für die Auswahl der Messstandorte war es besonders wichtig, einerseits die räumliche Verteilung von Schadstoffen zu modellieren, als auch Vergleichsmessungen mit bestehenden, amtlichen Stationen des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) zu ermöglichen. Die derzeitige Umsetzung umfasst zehn Umweltmessstationen des Konsortialpartners Bosch (IMB, Immission Measurement Box), die bereits an Laternen und Parkleitschildern installiert wurden (siehe Abbildung 1). Um das Ziel von 50 Sensoren zu erreichen, sollen weitere 16 IMB Sensoren montiert, sowie 25 Multi-Funktions-Gehäuse (MfGs) der Deutschen Telekom durch T-Systems implementiert werden. Die Auswahl der Standorte gewährleistet eine breite Abdeckung, sodass eine Analyse der Auswirkungen des Verkehrs auf angrenzende Wohngebiete möglich wird. Für den städtischen Hintergrund wurden Messpunkte in Wohnquartieren und Parks definiert, während verkehrsnaher Stationen entlang stark belasteter Hauptstraßen positioniert wurden. Parallel dazu wurden verschiedene Szenarien innerhalb der Pilotregion entwickelt, die in die Erstellung eines Digitalen Zwillinges einfließen. Diese Szenarien ermöglichen eine gezielte Untersuchung der Verkehrsauswirkungen unter unterschiedlichen Bedingungen. Beispiele hierfür sind Großveranstaltungen im Bereich des Sportforums (Quarterback Arena, RB-Stadion), die durch ihren Einfluss auf Verkehrsströme eine nachhaltige Steuerung erfordern. Weitere Szenarien umfassen die Analyse von Straßensperrungen sowie besondere Umweltbedingungen, etwa Hitzewellen oder umfangreiche Maßnahmen zur Förderung des Radverkehrs.

Die Entwicklung der Szenarien erfolgte in iterativer Zusammenarbeit mit der Stadt Leipzig und beruht auf der Identifikation von Hot Spots, aktuellen Umwelt- und Verkehrsthemen sowie den Anforderungen der Projektpartner. Ziel ist eine anwendungsbezogene Entwicklung des Digitalen Zwillinges zur Optimierung des Verkehrsflusses und gleichzeitig die Umweltbelastungen in der Pilotregion zu reduzieren, um folglich eine umweltsensitive Verkehrssteuerung zu realisieren. Durch die Integration der Messstationen, die Nutzung amtlicher Datenquellen und die Betrachtung spezifischer Szenarien wird ein umfassendes Umweltmessnetzwerk aufgebaut, welches als Grundlage für zukünftige Planungs- und Steuerungsmaßnahmen dienen soll. Im Vergleich zum bestehenden amtlichen Netz bietet das flächendeckende Netz des Projekts eine deutlich höhere räumliche Abdeckung und eröffnet neue Möglichkeiten zur Analyse und Modellierung von Umwelt- und Verkehrsdaten im Stadtgeschehen.



EPSG:25833

Abbildung 1: AIAMO Umweltmessnetz der Pilotregion Leipzig

Derzeit wird intensiv an der Installation der Luftqualitätssensoren gearbeitet. Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, wurden neben der Platzierung im Stadtzentrum weitere Sensoren im nordöstlichen und südlichen Bereich der Pilotregion Leipzig aufgestellt. Die bisher installierten Messstationen des Konsortialpartners sind in der Abbildung schwarz umrandet markiert. Zusätzlich wurden Sensoren an den Referenzstationen des Landesamtes für Geologie, Umwelt und Landwirtschaft (LfULG) zur Kollokation installiert. Anhand Abbildung 2 wird der eingesetzte Luftqualitätssensor dargestellt. Neben Feinstaub (PM_{2.5} und PM₁₀) und Stickstoffdioxid (NO₂) werden durch den Sensor ebenfalls Ozon (O₃), Kohlenmonoxid (CO) und Schwefeldioxid (SO₂) gemessen. Einen Einblick in verschiedene Messreihen mit Fokus auf die PM- und NO₂-Daten wird in den folgenden Abschnitten erörtert.



LUFTQUALITÄTS-
MESSUNG

www.aiamo.de

Abbildung 2: IMB (Immission Measurement Box) Luftqualitätssensor der Firma Bosch

Durch die proaktive und konstruktive Zusammenarbeit mit den verschiedenen Ämtern innerhalb der Pilotregion konnte die Anbringung an bestehender Infrastruktur ermöglicht werden. In Abbildung 3 ist die exemplarische Anbringung der Sensoren an Stadlaternen sowie Parkleitschildern zu erkennen. Einerseits konnte damit die entsprechende Mindesthöhe von 2,50 m realisiert als auch die notwendige Stromversorgung sichergestellt werden.



Abbildung 3: Installationen an Parkleitsystemen und Stadtlaternen

In den kommenden Monaten wird die Installation weiterer Sensoren kontinuierlich fortgesetzt, um eine vollständige Integration aller Sensorstationen bis Mitte 2025 zu realisieren. Die erfolgreiche Umsetzung dieser Installationen wird durch die enge Zusammenarbeit mit verschiedenen Abteilungen und Ämtern der Stadt Leipzig sowie dem LfULG ermöglicht. Die geplante Betriebsphase des Umweltmessnetzes in der Pilotregion Leipzig wurde durch umfangreiche vorbereitende Arbeiten gewährleistet.

3 Umwelt- und Verkehrsdaten

3.1 Messungen der Luftqualität

Zur Analyse der Langzeitmittelwerte wurden die minütlichen Messungen der bereits installierten Sensoren über einen Zeitraum von 26.06. - 10.09.24 gemittelt und anschließend auf einer Karte visualisiert. Exemplarisch sind die Feinstaubmessungen ($PM_{2.5}$ $\mu g/m^3$) in Abbildung 4 dargestellt. Geringere Werte mit 4 bis 6 $\mu g/m^3$ sind im äußeren Stadtbereich an den Messstellen der Hintergrundkonzentration zu finden (z.B. West) wohingegen höhere Konzentrationen mit 6 - 8 $\mu g/m^3$ im Stadtzentrum und an den Verkehrsknotenpunkten zu finden sind (u.a. Jahnallee, Eutritzscher Str., Hbf). Der Sensor am UFZ (verkehrsnahe) ist zwar direkt an einer Kreuzung installiert, jedoch windgeschützt zwischen Bäumen gelegen und zeigt vermutlich aus diesem Grund verringerte Konzentrationen, während die UFZ (Hintergrund) Messung auf einer freistehenden Wiese installiert ist, somit vermutlich besser angeströmt werden kann und repräsentativere Werte liefert.

Sobald die Sensorik vollständig in der Stadt angebracht ist und die Datenbasis der Luftqualitätsmessungen sowohl die räumlichen als auch die zeitlichen Varianzen in ausreichendem Maße abdeckt, können tiefgreifendere Analysen, wie verschiedene statistische Verfahren (unter anderem maschinelles Lernen) angewendet werden. Räumliche und zeitliche Zusammenhänge der Luftqualitätsdaten zum Verkehrsaufkommen können herausgearbeitet werden, insbesondere im Zusammenspiel mit wechselnden meteorologischen Bedingungen.

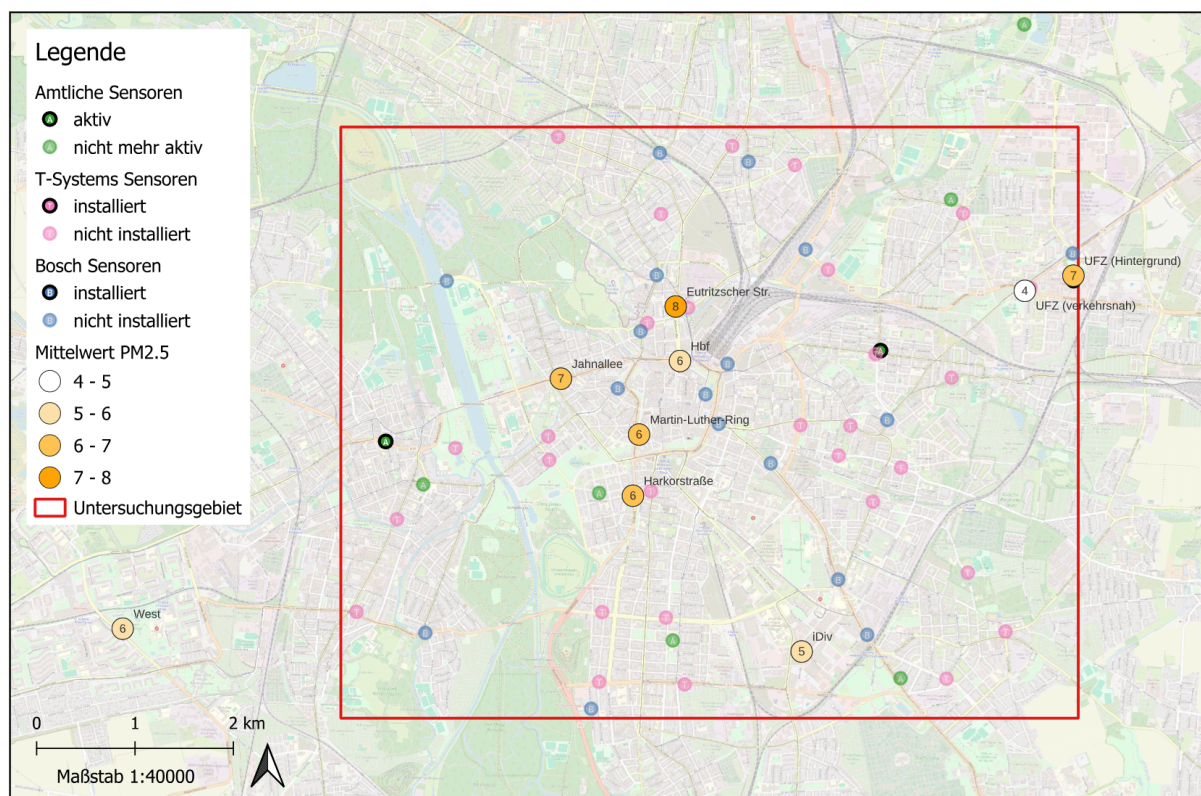


Abbildung 4: Mittlere $PM_{2.5}$ [$\mu g/m^3$] Messungen der installierten IMB Sensoren im Zeitraum 26.06. - 10.09.24

3.2 Plausibilitätsprüfung und Qualitätskontrolle der Umweltdaten

Im Rahmen des Projektes AIAMO wurden zwei der Bosch IMB Sensoren an amtlichen Standorten der urbanen Luftgütemessungen des LfULG installiert. Dadurch können die Messwerte der NO₂ und PM-Messungen der IMB Sensoren mit den Messwerten der deutlich komplexeren Messapparaturen der amtlichen Stationen verglichen werden. Somit ist eine erste Plausibilitätsprüfung der Daten möglich. Der Abgleich der Daten geschieht über Stundenmittelwerte, wobei aktuelle Messungen aus dem November eine sehr hohe Übereinstimmung zeigen (Abbildung 5).

Die Analyse der NO₂-Mittelwerte über einen Zeitraum von knapp 3 Wochen zeigt, dass der aktuell geltende Grenzwert des Jahresmittels nur in wenigen Fällen überschritten oder knapp erreicht wurde. Im Hinblick auf die ab 2030 geltende EU-Luftqualitätsrichtlinie, die einen Jahresmittelwert von maximal 20 µg/m³ für NO₂ vorsieht, wird der aktuell geltende Grenzwert halbiert. Auch die Grenzwerte für PM_{2,5} und PM₁₀ werden zukünftig gesenkt, was zu einer erhöhten Anzahl an Messstationen führen könnte, bei denen Grenzwertüberschreitungen – insbesondere bei den NO₂-Werten - zu erwarten sind.

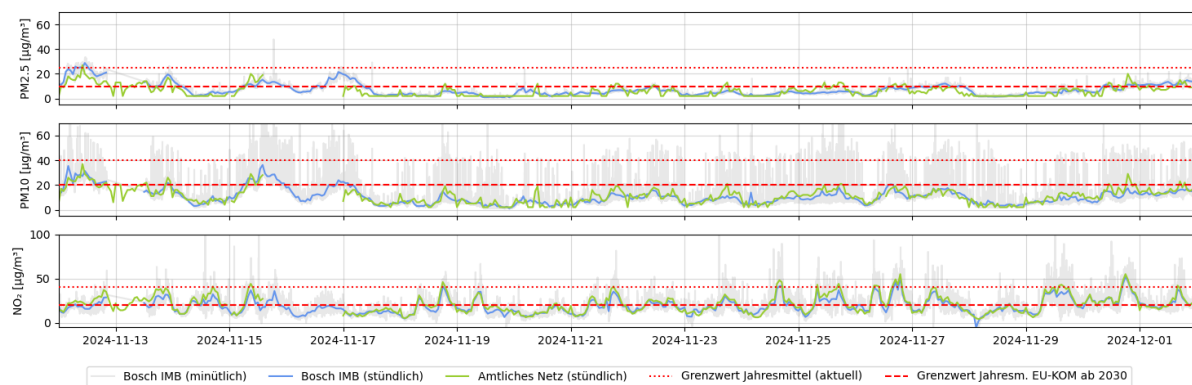


Abbildung 5: PM_{2,5}, PM₁₀ und NO₂ [µg/m³] Messungen verschiedener Sensoren an der amtlichen Luftgütemessstation in Leipzig Mitte vom 12.11.24 – 02.12.24. Im Vergleich sind die Zeitreihen der Bosch Sensorik (IMB) und der amtlichen Station gegenübergestellt.

Im Weiteren wird eine automatische Qualitätskontrolle auf den minütlich erhobenen Werten der IMB durchgeführt. Dazu werden die Luftqualitätsdaten in das digitale Ökosystem für FAIRES Zeitreihenmanagement des UFZ (Department RDM) eingespeist und kontinuierlich und voll automatisiert auf ihre Qualität geprüft. Insbesondere KI-Anwendungen, welche im Rahmen des Projektes AIAMO entwickelt werden, benötigen Daten höchsten Qualitätsstandards. Deswegen erhält jeder Datenpunkt ein Gütesiegel, die den Werdegang der Qualitätssicherung nachvollziehbar und damit reproduzierbar macht.

Das Framework SaQC (System for automated Quality Control, Schmidt et al, 2023) bietet eine Sammlung von Methoden und Algorithmen zur Analyse, Verarbeitung und Annotation von Zeitreihendaten. Es ist in Python geschrieben und sowohl als Python-API als auch als Command-Line-Tool verfügbar. Die Lösung zeichnet sich durch ihre Automatisierbarkeit, Reproduzierbarkeit und Standardisierbarkeit aus. Durch verschiedene statistische Tests können zum Beispiel Ausreißer detektiert und je nach Anforderung im Datensatz markiert und entfernt werden. In Abbildung 6 ist beispielhaft dargestellt, welche Sensitivität verschiedene Tests mit verschiedener Parametrisierung gegenüber Ausreißern haben können. Im Projektverlauf und mit dem Erhalt umfassender Daten zur Luftqualität unter verschiedensten meteorologischen und urbanen Bedingungen, sammeln wir Erfahrung, können so eine finale, sensortypspezifische Parametrisierung der Qualitätskontrolle erarbeiten und fortan in den automatisierten Workflow des Ökosystems für Zeitreihenmanagement einfließen lassen.

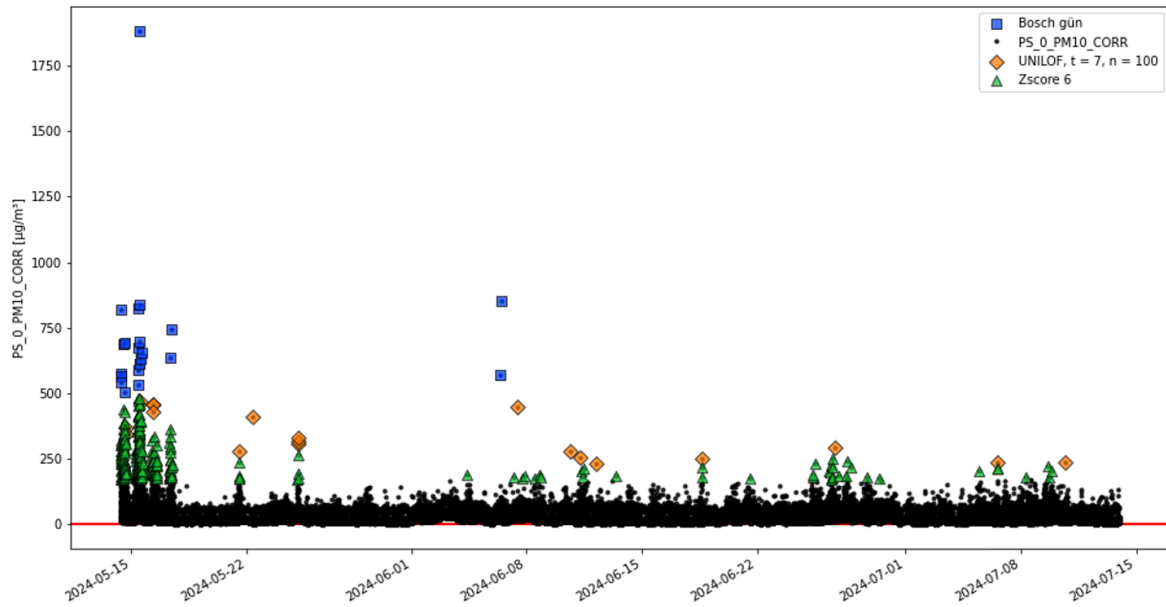


Abbildung 6: Automatisierte Qualitätskontrolle von Zeitreihendaten mit Hilfe von SaQC am Beispiel einer PM10 Messreihe im Sommer 2024. Beispielhaft wurden Ausreißer mit Hilfe verschieden parametrisierter statistischer Tests markiert. Die statistischen Tests sind in der Software SaQC umgesetzt und können durch den Anwender auf den jeweiligen Datensatz zugeschnitten werden. Im operationellen Betrieb der UFZ Infrastruktur geschieht die QC anschließend voll automatisch und kontinuierlich.

3.3 Verkehrsdetektoren

Verkehrszählungen aus stationärer Detektion können von der Stadt Leipzig über die Mobiltheke (Mobiltheke 2, 2024) abgerufen werden. Der entsprechende Datenbezug wurde im April 2024 eingerichtet und liefert seitdem zu jedem fahstreifengenaue Detektor durchgehend alle 5 Minuten aktuelle Daten.

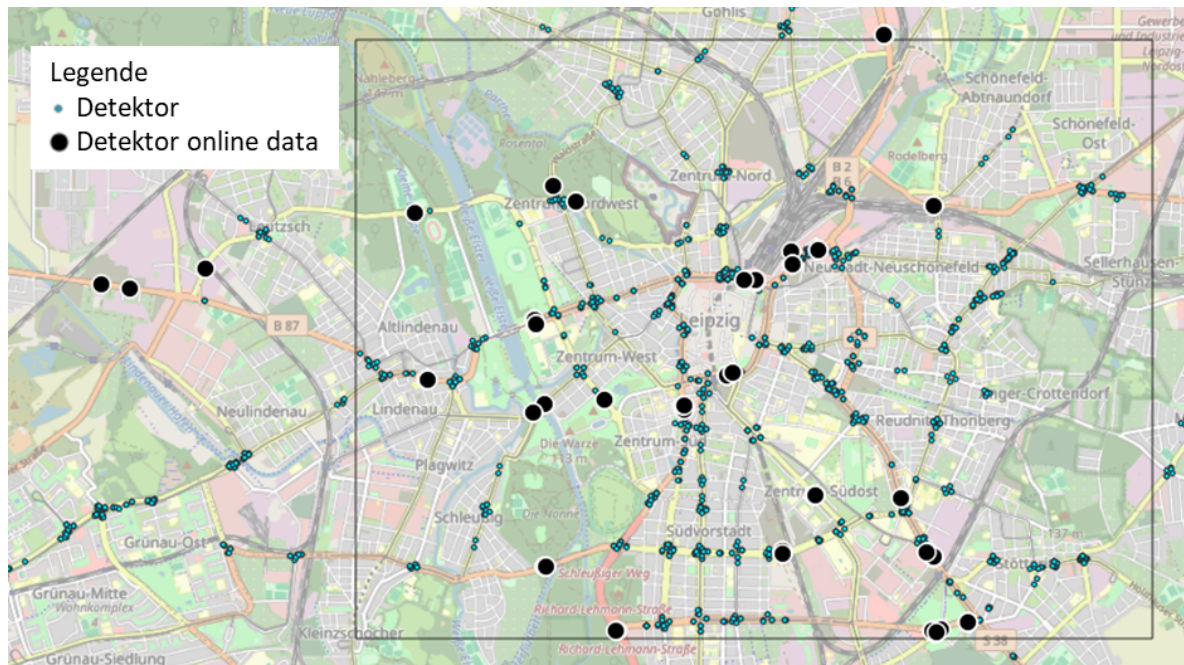


Abbildung 7: Kartenübersicht aller Detektoren sowie derjenigen, für welche 5-Minuten Online Daten abrufbar sind im Fokus des Untersuchungsgebiets.

Abbildung 7 zeigt einen Ausschnitt der Karte mit Fokus auf dem im Projekt definierten Untersuchungsgebiet und die verfügbaren Detektoren. Insgesamt sind dies laut statischer Liste in der Mobiltheke (Mobiltheke 1, 2024) 2171. Die meisten dieser Detektoren sind jedoch Detektoren an LSA, welche zwar für die LSA-Schaltprogramme hinreichend genau, für valide Zählungen jedoch zumeist nicht hinreichend sind. Insofern werden seitens der Stadt Leipzig vorzugsweise die 5-Minuten Daten der strategischen Detektoren zur Verfügung gestellt. Aufgrund technischer Probleme schwankt die Anzahl, die de facto über die Mobiltheke abrufbar ist, stark und bewegt sich zumeist bei 61 und insgesamt im Bereich von 56 bis 98 wie in Abbildung 8 ersichtlich.

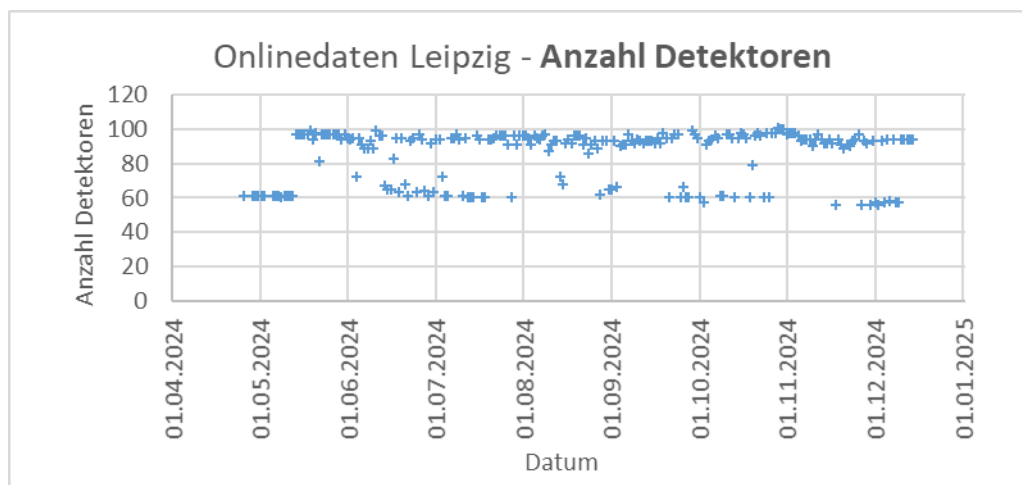


Abbildung 8: Anzahl Fahstreifen-genaue Detektoren je Tag, für welche 5-Minuten Online Zählungen abrufen sind.

Erste Analysen der Daten zeigen, dass diese – wo vorhanden – sehr valide Zählwerte liefern. Abbildung 9 zeigt die Entwicklung der Tageszählwerte im Verlauf einiger Monate. Insbesondere ist hier zu erkennen, dass der Verkehr nach den Ferien leicht zunimmt und in typischen Mustern im Wochenverlauf schwankt, insbesondere samstags und sonntags um einiges niedriger ist als an den Werktagen Montag bis Freitag. Noch etwas deutlicher sieht man dies in den zwei Abbildungen 10, welche zu Wochentagen gruppierte Darstellungen zeigen sowie Wochentags-spezifische Werte angeben. So wird deutlich, dass das Verkehrsaufkommen an den einzelnen Wochentagen wiederkehrend typisch ist und im Vergleich zu den Werktagen Montag bis Freitag an Samstagen ca. 25% weniger und an Sonntagen 40% weniger Verkehr gezählt wird.

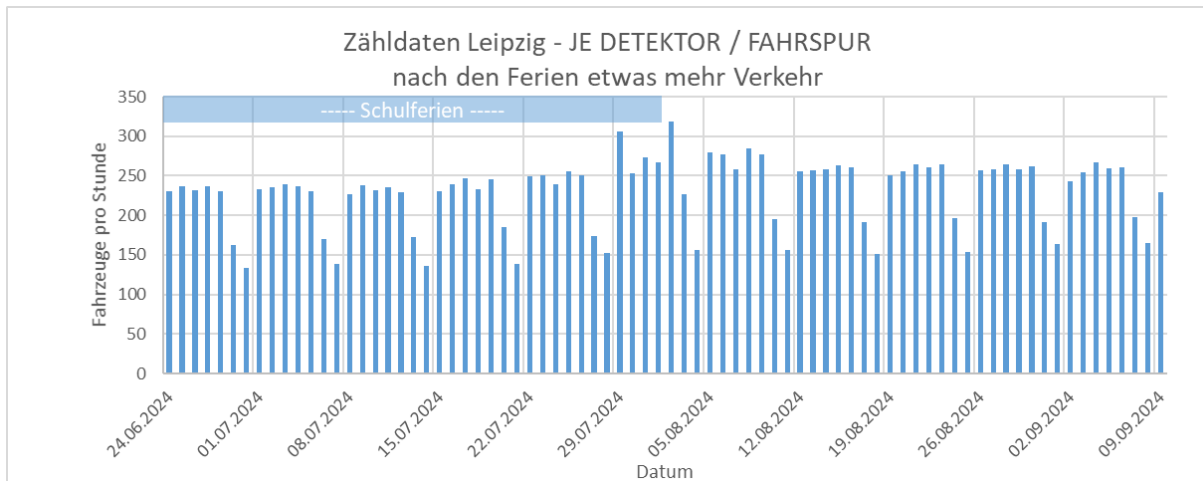


Abbildung 9: Durchschnittliche Tageszählwerte je Detektor und Fahrspur über alle verfügbaren Zählwerte.

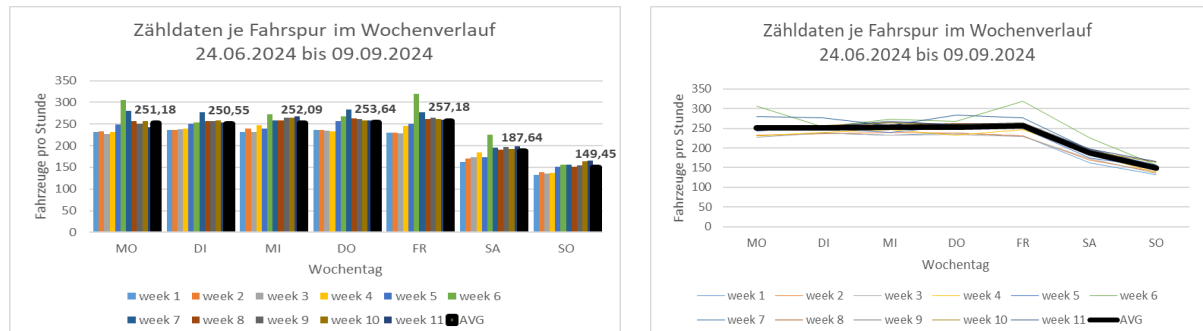


Abbildung 10: Zu Wochentagen gruppierte durchschnittliche Zähldaten je Detektor / Fahrspur.

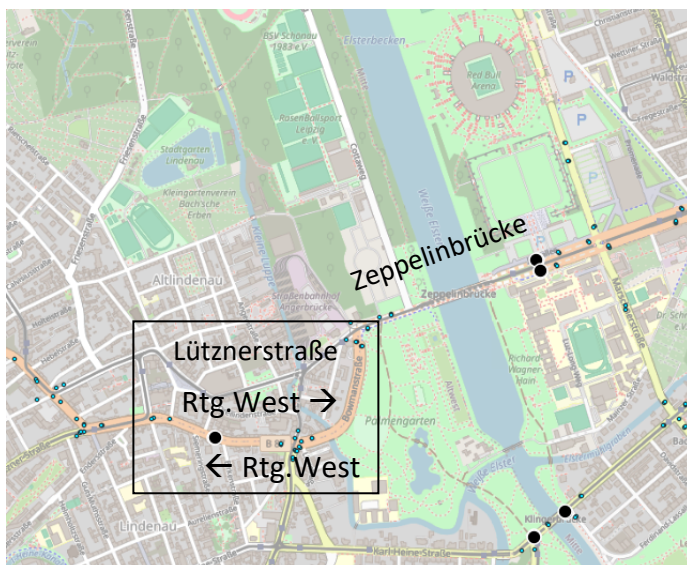


Abbildung 11: Kartenausschnitt Quarterback Arena, Zeppelinbrücke, Lütznierstraße.

Schaut man sich die Zählwerte an einzelnen Detektoren an, so stellt man ebenso fest, dass Ereignisse, die Auswirkungen auf die Zählraten haben sollten, erkennbar sind. Abbildung 11 zeigt das Gebiet um die Zeppelinbrücke, welche nahe der Quarterback Arena liegt und ab 02.07.2024 für den KfZ Verkehr gesperrt wurde. Wie zu erwarten wird an der Zählstelle Lütznerstraße, welche etwas westlich der Brücke liegt, deutlich weniger KfZ Verkehr gezählt und das in beiden Fahrrichtungen wie in Abbildung 12 ersichtlich. Dass der KfZ Verkehr ab ca. Oktober wieder etwas zunimmt, ist im Jahresverlauf aufgrund sich verändernder Witterungsbedingungen normal und zu erwarten. Interessant ist hierbei allerdings, dass die Zählungen in Fahrtrichtung West höher sind als in Fahrtrichtung Ost, was sich – wie in Abbildung 13 zu sehen – nicht nur auf die Werkstage beschränkt, sondern auch auf die Wochenenden. Insbesondere für die Fahrtrichtung Ost scheint es also mindestens eine Alternativroute zu geben, die gerne durch die Fahrenden genutzt wird. Abschließend bemerkbar ist, dass - wie in Abbildung 12 ersichtlich – die Unterschiedlichkeit der Zählungen je Fahrtrichtung vor der Sperrung im Mai und Juni ebenso festzustellen ist, allerdings mit teils deutlich höheren Zählungen in Fahrtrichtung Ost.

Insgesamt ist zu diesem Zeitpunkt im Projekt festzustellen, dass Verkehrsdaten aus lokaler Detektion in hinreichender Anzahl und Qualität vorliegen, sodass erwartbare Effekte zu erkennen sind.

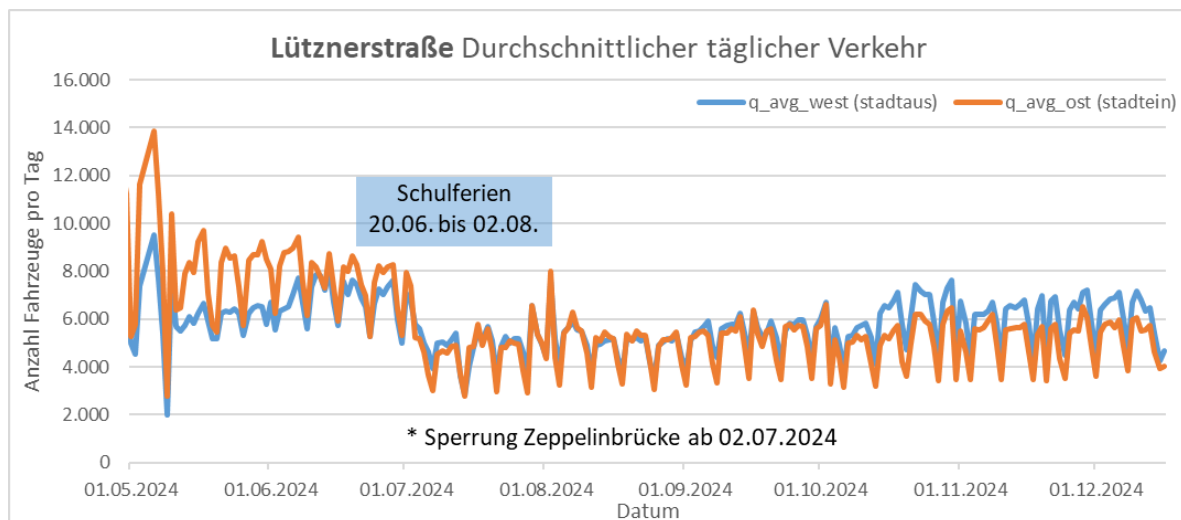


Abbildung 12: Entwicklung der Tageszählwerte in der Lütznerstraße je Fahrtrichtung im Verlauf der Monate.

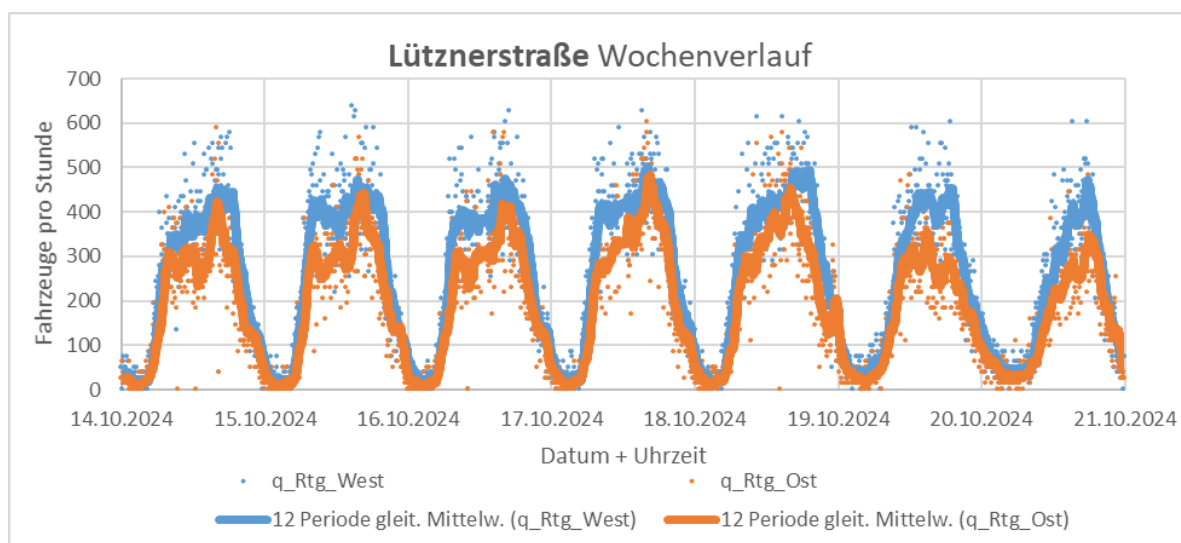


Abbildung 13: Tages- und Wochenverlauf der Zählwerte in der Lütznerstraße als 5-Minuten Werte je Fahrtrichtung.

4 Korrelation: Luftqualität und Verkehr

4.1 Typischer Wochenverlauf

Ziel des Projektes AIAMO ist es, ein umweltsensitives Verkehrsmanagement zu entwickeln. Um den Effekt des Verkehrs auf die Luftqualität und damit das Potential der Verkehrssteuerung einschätzen und möglichst effiziente Maßnahmen entwickeln zu können, werden in einem ersten Schritt die Messwerte der Luftqualitätssensoren mit Messungen des Verkehrsaufkommens in Verbindung gebracht.

Die Messungen der Stickstoffdioxid-Konzentrationen (NO_2) aller bisher installierten Sensoren wurden ausgewertet und ein typischer Tages- und Wochenverlauf erstellt. Dazu wurden die mittleren Konzentrationen der Sensoren in einem Zeitraum vom 10. Juni 2024 bis 05. August 2024 für jede Stunde des Wochentages aggregiert, ein Mittelwert gebildet und in Abbildung 14 (oben) aufgetragen. Im gleichen Verfahren wurden Mittelwerte der Verkehrsdetektoren gebildet und in Abbildung 14 (unten) dargestellt.

Das Tagesmuster bei den NO_2 -Konzentrationen zeigt Spitzenwerte während der Rushhour um 7 Uhr morgens und die niedrigsten Werte zur Mittagszeit. In der Nacht ist die NO_2 Konzentration leicht höher als am Tage, da dort kein Abbau von NO_2 zu Ozon (O_3) durch das Sonnenlicht stattfindet. In den Verkehrszahlen zeigt sich ein typischer Wochenverlauf mit höherem Verkehrsaufkommen von Montag bis Donnerstag. Am Freitag sind zu Spitzenzeiten weniger Fahrzeuge unterwegs, dafür bildet sich ein früherer Peak zum Nachmittag aus. Die Samstage und Sonntage zeigen im Allgemeinen deutlich geringere und zeitlich verzögerte Verkehrszahlen im Vergleich zu den Werktagen.

Im Gegensatz zu den Verkehrszählungen sind die Umweltdaten weniger scharf im Wochen- und Tagesverlauf ausgebildet. Sie unterliegen generell größeren Schwankungen und stehen in starker Abhängigkeit zu den aktuellen Witterungsbedingungen. Deutlich zeigt sich jedoch eine abgeflachte Kurve der NO_2 -Konzentrationen an Sonntagen. Ebenfalls auffällig ist ein deutlicher Anstieg der NO_2 -Konzentrationen am frühen Freitagnachmittag, welcher sehr wahrscheinlich mit dem erhöhten Verkehrsaufkommen zu dieser Zeit korreliert. Im betrachteten Zeitraum fanden zudem vier EM-Spiele statt. Alle Spiele fielen auf einen Freitagabend, weswegen im folgenden Kapitel eine genauere, ereignisbezogene Betrachtung der Luftqualitätswerte erfolgt.

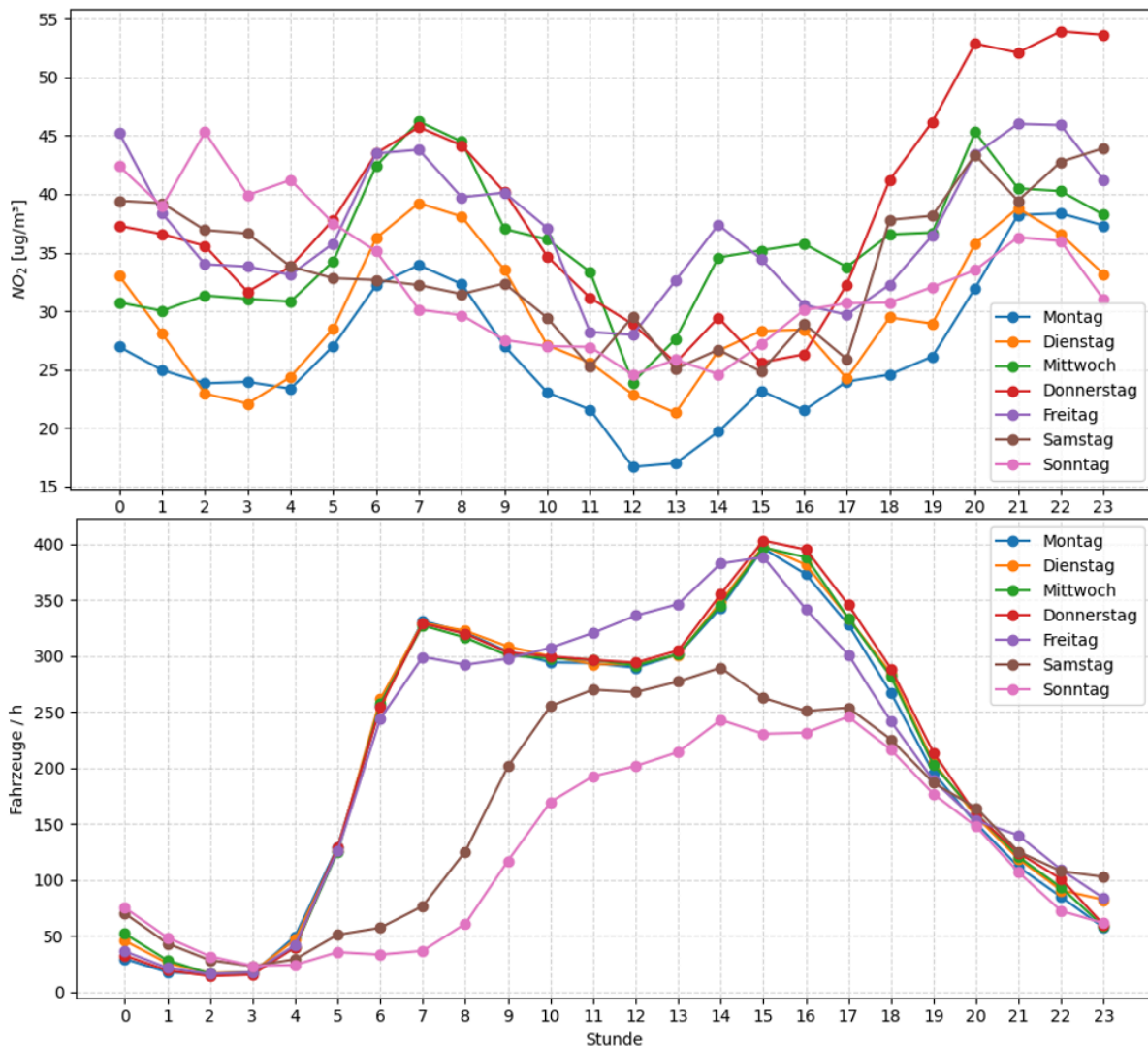


Abbildung 14: Typischer Wochenverlauf (gemittelt) der Luftqualität (NO₂, oben) und der Fahrzeuge pro Stunde (unten). Die gemittelten Werte beziehen sich auf einen Zeitraum vom 10. Juni bis 5. August 2024.

Weitere Auswertungen im Projektverlauf werden sich explizit auf die Korrelation einzelner Luftqualitätsmessreihen mit benachbarten Zeitreihen des Verkehrsaufkommens konzentrieren. Dabei werden unter anderem die vorherrschenden meteorologischen Parameter wie Sonneneinstrahlung, Windstärke, Windgeschwindigkeit und Niederschlag mit einbezogen, da diese die Verteilung der Partikel und Gase in der Luft beeinflussen, sowie deren Abbau steuern. Schrittweise wird sich so ein Bild von den räumlich und zeitlich veränderlichen Beziehungen zwischen Luftqualität, Verkehr und Umweltfaktoren in der Pilotregion Leipzig ergeben, welches die Maßnahmengestaltung der umweltsensitiven Verkehrssteuerung maßgeblich mitbestimmen wird.

4.2 Ereignisbezogene Analyse

Das Red Bull Stadion, die Festwiesen und die Quarterback Immobilien Arena an der Jahnallee stellen einen bedeutenden Veranstaltungsort in Leipzig dar. Zur EM 2024 fanden drei Gruppenspiele und ein Viertelfinale in der Red Bull Arena statt. Im Anschluss an das letzte Spiel am 2. Juli wurde die Zeppelinbrücke gesperrt, welche eine Hauptverkehrsader des Anfahrtsverkehrs des Veranstaltungsortes darstellt (siehe hierzu auch Abbildung 11).

Zur Untersuchung der Auswirkung des Veranstaltungsverkehrs auf die Luftqualität, wurden in einer ersten Analyse die Zeitreihen der PM_{2.5} und NO₂-Messungen der Stationen Jahnallee (erst ab dem 24.06.24) und Leipzig Mitte (Hbf) ausgewertet, tägliche Mittelwerte gebildet und mit den

Veranstaltungen und weiteren verkehrsrelevanten Events korreliert (Abbildung 15). Insbesondere zum EM-Spiel Niederlande - Frankreich am 21.06.24 wurden deutlich erhöhte Konzentrationen von NO_2 gemessen. Zu dieser Zeit konnten ebenfalls erhöhte Konzentrationen von $\text{PM}_{2.5}$ festgestellt werden. In den ersten Tagen nach der Sperrung der Jahnallee ab dem 03. Juli ist zudem eine leichte Verbesserung der Luftqualität zu verzeichnen. Ob sich dieses Verhalten im weiteren Verlauf des Jahres bestätigt, wird in kommenden Analysen untersucht werden. Außerdem werden weitere Luftqualitätssensoren im Umfeld des Eventgeländes installiert, um die Abgase des Zu- und Abfahrtsverkehr umfassend erfassen zu können.

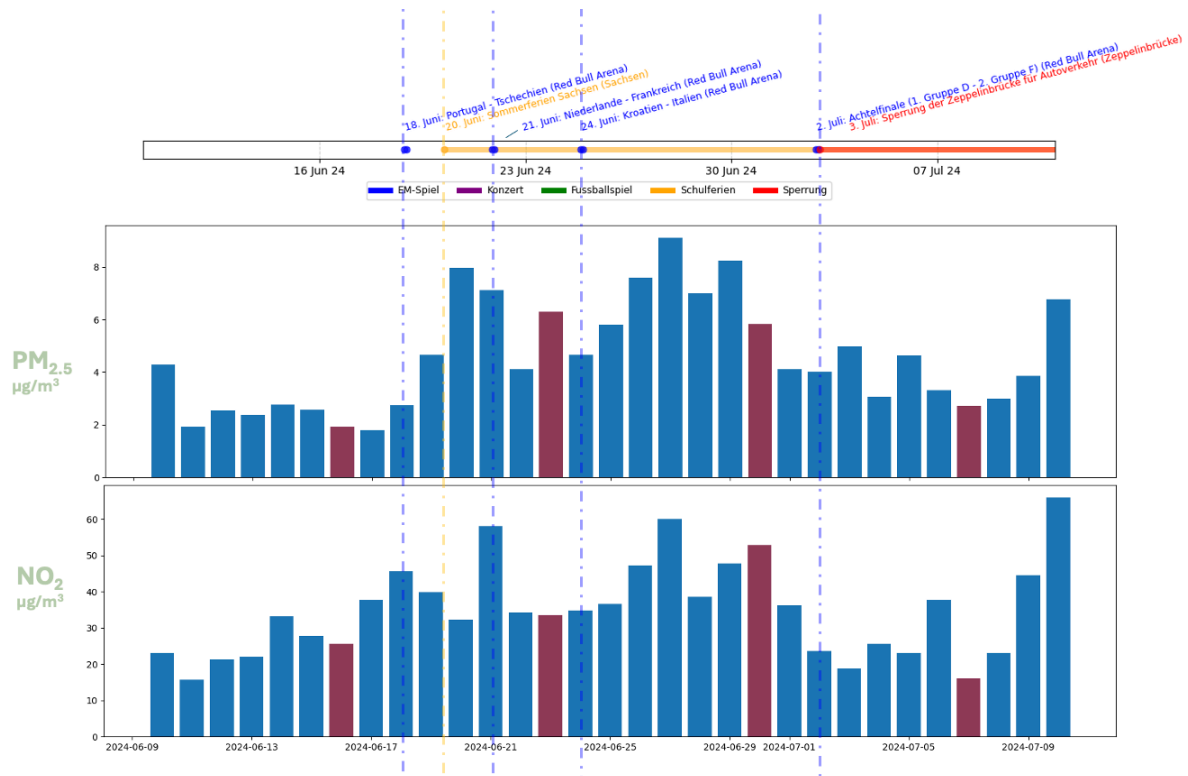


Abbildung 15: Tagesmittelwerte der $\text{PM}_{2.5}$ und NO_2 Messungen der IMB an der Jahnallee (ab dem 24.06.24) und der IMB in Leipzig Mitte.

5 Fazit und Ausblick

Anhand dieses Beitrages wurde durch erste Ergebnisse und Messungen deutlich inwieweit das Forschungsprojekt AIAMO sektorenübergreifende Ansätze zur umweltsensitiven Verkehrssteuerung erzielen kann.

Der dabei vorgestellte Aufbau eines umfassenden, hochskalierbaren Umweltmessnetzes in der Pilotregion Leipzig bildet dabei das Fundament für die Entwicklung von Digitalen Zwillingen auf Basis von Umwelt- und Verkehrsdaten, um somit das urbane Verkehrsgeschehen und dessen Umweltauswirkungen präzise abzubilden. Die Kombination aus Luftqualitätsmessungen, automatisierter Qualitätskontrolle sowie der Analyse von Verkehrsdaten ermöglicht fundierte Rückschlüsse auf die Zusammenhänge zwischen Verkehr und Umweltbelastung. Dabei wurden bisher gezielt Tages- und Veranstaltungsmuster untersucht. Die Auswertungen zeigen deutliche Tagesmuster bei Stickstoffdioxid- (NO_2) und Feinstaubwerten ($\text{PM}_{2,5}$, PM_{10}), insbesondere Spitzen während der Rushhour und bei Großveranstaltungen. Entsprechende Höchstwerte wurden in verkehrsreichen Stadtzentren gemessen, welche Grenzwertüberschreitungen verzeichnen. Dies untermauert die Dringlichkeit, nachhaltige Lösungen in urbanen Zentren zu entwickeln. Die Korrelation von Umwelt- und Verkehrsdaten verdeutlicht den Einfluss des Verkehrs auf die Luftqualität, wobei zeitliche Verzögerungen und meteorologische Faktoren berücksichtigt werden.

Zusammenfassend zielt das Projekt AIAMO darauf ab, durch datengestützte Modelle und KI-basierte Ansätze eine umweltsensitive Mobilitätssteuerung zu ermöglichen. Hierbei steht die Förderung multimodaler Mobilitätslösungen sowie die Reduktion von Emissionen im Vordergrund. Die Erkenntnisse aus der Pilotregion Leipzig dienen als Grundlage für verkehrsoptimierende Maßnahmen wie die gezielte Steuerung des öffentlichen Nahverkehrs und die Förderung alternativer Mobilitätsformen (z.B. Radverkehr).

Als nächstes Ziel wird verfolgt, den Aufbau des Umweltmessnetzes auf 50 Sensoren zu erweitern um eine noch genauere Abdeckung und Analyse zu gewährleisten, sodass detailliertere Analysen hinsichtlich der Korrelationen zwischen Umwelt- und Verkehrsmessungen ermöglicht werden. Grundsätzlich sollen die Ergebnisse aus Leipzig in die strategische Stadtplanung zur Anpassung an zukünftige Umweltauflagen einfließen um durch die gezielte Ableitung von Maßnahmen nachhaltige Lösungen im Sinne der Mobilitätswende zu schaffen.

Literatur

- City of Leipzig (2024). INSEK Leipzig 2030 - Integrated Urban Development Concept, <https://english.leipzig.de/construction-and-residence/urban-development/insek-leipzig-2030-integrated-urban-development-concept>, abgerufen Dezember 2024.
- EU-Kommission (2024). EU air quality standards. https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality_en?prefLang=de, abgerufen Dezember 2024.
- Mobilithek 1 (2024) - Statische Detektordaten Stadt Leipzig. <https://mobilithek.info/offers/110000000002877001>, abgerufen April 2024.
- Mobilithek 2 (2024) - Dynamische Detektordaten Stadt Leipzig. <https://mobilithek.info/offers/110000000002877002>, abgerufen seit 21.04.2024.
- Schmidt, L., Schäfer, D., Geller, J., Lünenschloss, P., Palm, B., Rinke, K., Rebmann, C., Rode, M., & Bumberger, J. (2023). System for automated Quality Control (SaQC) to enable traceable and reproducible data streams in environmental science. *Environmental Modelling & Software*, 169, 105809, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105809>.
- UNFCCC (2015). United Nations Framework Convention on Climate Change. *Paris Agreement*. Adopted at the 21st Conference of the Parties to the UNFCCC (COP21), Paris, France, December 12, 2015. <https://unfccc.int/documents/184656>. Abgerufen Dezember 2024
- Umweltbundesamt (2024): Luftqualitätsrichtlinie. Grenz-, Ziel- und Schwellenwerte. Wien. <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/luft/daten-luft/luft-grenzwerte>, abgerufen am 26. September 2024.