

Förderprojekt



**Mannheimer
Verkehrstransparenz-
plattform für den
Individualverkehr**

der

MVV Energie AG



Aus dem Programm
Digitalisierung kommunaler
Verkehrssysteme

gefördert durch:



Schlussbericht des Förderprojektes MaVI

Vorhabenbezeichnung	Mannheimer Verkehrstransparenzplattform für den Individualverkehr (MAVI)
Zuwendungsempfänger	MVV Energie AG Luisenring 49 68159 Mannheim
Förderkennzeichen	16DKV42062
Laufzeit des Vorhabens	01.02.2020 bis 31.07.2022
Berichtszeitraum	01.02.2020 bis 31.07.2022
Veröffentlichungsmonat	Februar 2023
Autor:innen	Dr. Robert Thomann Cem Tekinbas Marius Berlinghof Eric Bauer Yasmin Lachmann
Kontakt für Rückfragen	smartcities@mvv.de 0621 290 1309
Projekthomepage	https://www.mvv.de/smart-cities/mavi www.mvv.de/smartcities
Public MaVI Dashboard	https://dashboard.mvvsmartcities.com/#/no2-prognose



Inhaltsverzeichnis

Inhalt

1.	Kurzdarstellung	4
1.1	Aufgabenstellung	4
1.2	Voraussetzungen der Durchführung des Vorhabens	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2.	Eingehende Darstellung	7
2.1.1	Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung mit den Zielen.....	7
2.1.2	Konzeption und Planung (AP 2)	8
2.1.3	Umsetzung (AP 3).....	11
2.1.4	Betrieb (AP 4).....	14
2.1.5	Evaluation und Datenanalyse (AP 5).....	16
2.1.6	Vernetzung und Erweiterung (AP 6)	19
2.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	20
2.3	Verwertbarkeit der Ergebnisse	21
2.4	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	21
2.5	Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	22
3.	Erfolgskontrollbericht.....	23
3.1	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms.....	23
3.2	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens	23
3.3	Fortschreibung des Verwertungsplans	24
3.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	25
3.5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer:innen	25
4.	Kurzfassung	26
5.	Anhang.....	28



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Standorte zur Fahrzeugerkennung entlang des „Mannheimer Rings“ im innerstädtischen Bereich	8
Abbildung 2: Architekturschaubild IoT-Center - Frontend und Backend.....	9
Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Prognoseprozesses.....	10
Abbildung 4: Auswahl geeigneter Instrumente zur anreizbasierten Verkehrsbeeinflussung.....	10
Abbildung 5: Datenerhebung im Feld und Klassifizierung.....	11
Abbildung 6: Dashboard zur Anzeige der Fahrzeugdaten und Gegenüberstellung zu Umweltdaten.....	12
Abbildung 7: Mobilitätskarte zeigt die Anzahl der klassifizierte Fahrzeuge in sowohl in Echtzeit als auch historisch.....	12
Abbildung 8: Unterschiedliche NO ₂ Prognosen (grau) in Gegenüberstellung mit den realen Messwerten (rot).....	13
Abbildung 9: Ausschnitt Public Dashboard zur Stickstoffdioxid Prognose und Darstellung.	14
Abbildung 10: Aufnahme Wärmebildkamera und Klassifizierung am 18.10.2021	15
Abbildung 11: Spektrogramme zeigen, dass die Signaturen in einem sehr ähnlichen Frequenzbereich mit Ausnahme des beschleunigten Verbrenners liegen	17
Abbildung 12: Auswirkungen 9 € Ticket auf den Verkehr in Mannheim ist minimal (Summe gezählte Fahrzeuge Zeitraum April bis Juli 2022 an wichtigen Verkehrsknotenpunkten in Mannheim).....	18
Abbildung 13: Ein Stunden Verkehrsprognose / Einfluss der Variablen auf MAE.....	19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Meilensteine des Projektes	7
---	---

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
CAMS	Copernicus Atmosphere Monitoring Service
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
MAE	Mittlerer Absoluter Fehler
MaVI	Mannheimer Verkehrstransparenzplattform für den Individualverkehr
TLS	Transport Layer Security
VPN	Virtuelles privates Netzwerk
WDR	Wide Dynamic Range

1. Kurzdarstellung

Knapp 170.000 Menschen pendelten 2019 pro Tag nach und aus Mannheim, die meisten davon mit dem Auto. Entsprechend hoch war die Schadstoffbelastung in der Luft. Der Jahresmittelwert der Stickstoffdioxid-Belastung lag bei $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und damit $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ über dem Grenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Um Maßnahmen zur Vermeidung einer Grenzwertüberschreitung rechtzeitig einzuleiten, verfolgt das Projekt MaVI (Mannheimer Verkehrstransparenzplattform für den Individualverkehr) die Entwicklung eines Vorhersagemodells.

Im ersten Schritt werden Wärmebildkameras an Knotenpunkten installiert, um Fahrzeuge zu zählen und zu klassifizieren. Die Verkehrsdaten werden anschließend zusammen mit weiteren Umweltdaten in der Verkehrstransparenzplattform gespeichert, verarbeitet und visualisiert. Zudem werden Korrelationen des erhobenen Verkehrsaufkommens zum Ausstoß von Umweltschadstoffen und des Wetters untersucht, um darauf die Modellbildung aufzubauen. Sowohl Echtzeitinformationen, historische Werte als auch Vorhersagen werden schließlich in einem frei zugänglichen Dashboard bereitgestellt. Auf Basis der Vorhersagen werden Maßnahmen zur Reduktion der Schadstoffbelastung abgeleitet.

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens ist die Vermeidung einer Grenzwertüberschreitung von Luftschadstoffen durch rechtzeitig eingeleitete Maßnahmen. Im ersten Schritt ist eine Verkehrstransparenzplattform für die Verarbeitung, Analyse und Visualisierung der Verkehrs- und Umweltdaten aufzubauen. Darauffolgend soll an Knotenpunkten im Innenstadtbereich von Mannheim mittels Sensorik der Individualverkehr erfasst und entsprechend den Klassen Zweirad, PKW, Klein- und Großtransportern sowie LKWs klassifiziert werden. Die Sensoren müssen witterungsbeständig sein und den Anforderungen des Datenschutzes unter Berücksichtigung der DSGVO entsprechen. Um die Daten an die Verkehrstransparenzplattform zu übermitteln ist darüber hinaus eine geschützte Kommunikationsinfrastruktur zu schaffen. Zusätzlich zu den Verkehrsdaten sind weitere Daten, wie die Luftmesswerte und Wetter, zu erheben.

Die Verkehrs- und Umweltdaten sind auf Korrelationen zu untersuchen, um anschließend ein Prognosemodell (nachfolgend auch Prediction-Modell genannt) zu entwickeln. Die Daten und Prognoseergebnisse sind informativ und visuell zum einen Verkehrsplaner:innen und zum anderen den Pendler:innen zur Verfügung zu stellen. Schlussendlich sind geeignete Anreizmodelle zu bilden, um bei zu erwartender Grenzwertüberschreitung gezielte Maßnahmen einleiten zu können.

1.2 Voraussetzungen der Durchführung des Vorhabens

Grundlage für alle Maßnahmen ist eine umfangreiche und detaillierte Bestimmung des Mobilitätsverhaltens. Eine Messung des Individualverkehrs, untergliedert in die verschiedenen Mobilitätsformen wie Schwerlastverkehr, leichte Nutzfahrzeuge, PKW, Motorräder, an den relevanten Verkehrsknoten, in Kombination mit weiteren, die Luftqualität beeinflussenden Faktoren, wie Wettersituation und Wochentag, ist erforderlich. Aufbauend auf diesem Modell können dann, gezielt zu bestimmten Zeiten, Maßnahmen zur Verkehrsbeeinflussung ergriffen werden. Hierfür müssen unterschiedliche Sensoren an Verkehrsknotenpunkten installiert und eine Verkehrsplattform, unter Berücksichtigung des Datenschutzes, entwickelt werden. Eine weitere Voraussetzung ist die Schaffung von Akzeptanz bei der Bevölkerung für die ergriffenen Maßnahmen.



1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde in die nachfolgenden 6 Arbeitspakete unterteilt:

AP 1 Projektmanagement
<ul style="list-style-type: none"> • Projektkoordination, -organisation, -dokumentation • Begleitung während der gesamten Projektlaufzeit
AP 2 Konzeption und Planung
<ul style="list-style-type: none"> • Standortplanung und Sensorauswahl • Konzeption der IT-Architektur einschließlich Schnittstellen sowie Dashboard • Planung des Testbetriebs und Evaluation • Konzeption des Prediction-Modells für den Verkehr einschließlich notwendiger Datenpunkte • Auswahl von Instrumenten zur Verkehrsbeeinflussung abhängig vom Prediction-Modell (später im Projekt) • Simulation der NO_x Beeinflussung
AP 3 Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> • Beschaffung, Montage und Installation der Wärmebildkameras für die Verkehrszählung sowie Einbau weiterer Sensoren zur Erhebung relevanter Umweltdaten • Implementierung und Deployment des IT-Backends, in das die Verkehrs- und Umweltdaten fließen, einschließlich Schnittstellen • Implementierung und Deployment des Visualisierungsdashboards einschließlich Visual-Analytics Komponenten • Inbetriebnahme des Gesamtsystems • Implementierung des Prediction-Systems und kontinuierliches Training • Implementierung einer Echtzeitempfehlung für Verkehrsbeeinflussung
AP 4 Betrieb
<ul style="list-style-type: none"> • Betrieb des IT-Backends und der Datenbanken • Arbeitsschritt 4.2 Betrieb und betriebsbedingte Weiterentwicklung des Dashboards • Wartung und Entstörung der Sensoren und der Kommunikationsstrecke • Kontinuierliche Datenauswertung und Bereitstellung der Auswertung • Datenanalyse hinsichtlich einer kontinuierlichen Verbesserung des Prediction-Modells mittels ML und klassisch analytischer Methoden • Kontinuierliche Prognose der Verkehrssituation
AP 5 Evaluation / Datenanalyse
<ul style="list-style-type: none"> • Darlegung des Prediction-Modells einschließlich der Sensitivität gegenüber verschiedener Einflussfaktoren • Bewertung von Maßnahmen zur Verkehrsbeeinflussung • Effekt der Informationsbereitstellung auf die Verkehrssituation • Veränderung der allgemeinen Mobilität
AP 6 Vernetzung / Erweiterung
<ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung von Daten im Sinne der Open Data Policy • Integration von Schnittstellen zu Sharing Diensten und weiteren neuen Partnern • Formulierung weiterer sinnvoller Schritte zur weiteren Reduktion von Luftschadstoffen

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Seit Mitte 2019 gibt es in einigen deutschen Städten ein Diesel Fahrverbot für Euro 4 und 5. Anlass war die jahrelange andauernde Überschreitung der EU-Grenzwerte für Stickstoffdioxid in vielen Regionen. Das Problem, die Einhaltung ist nicht flächendeckend kontrollierbar, denn dies würde eine Kameraüberwachung mit Plakettenerfassung voraussetzen. Weitaus problematischer ist die Reaktion der Diesel Fahrer. Dies reicht von Klagen bis hin zur Wiedersetzung. Es kam innerhalb eines Jahres zu über 16.000 Verstößen, die Dunkelziffer nicht eingerechnet¹. Die Wirkung des Fahrverbots lässt sich noch nicht abschließend klären aufgrund der Corona Pandemie. Die Stadt Mannheim hingegen hat sich gegen Diesel Fahrverbote ausgesprochen mit der Begründung, erst alle anderen Maßnahmen, wie die Elektrifizierung von kommunalen Fahrzeugen, auszuschöpfen.

Um Informationen über das Verkehrsaufkommen zu erlangen, kommen häufig Überkopfdetektionen oder Induktionsschleifen zum Einsatz. Überkopfdetektionen werden in der Regel über Radar, Lidar oder Ultraschall realisiert. Diese Verfahren eignen sich sehr gut dazu, Geschwindigkeit und Abstände zu messen. Sie eignen sich jedoch nicht dazu, verschiedene Verkehrsteilnehmer:innen zu erfassen und zu klassifizieren. Kamerabasierte Systeme eignen sich hingegen besonders gut für die Erkennung des Individualverkehrs. Durch den Einsatz von tiefen neuronalen Netzen kann individuell zwischen verschiedenen Klassen von Verkehrsteilnehmer:innen unterschieden werden.

Für die Modellbildung von Verkehrsemissionen existiert eine Vielzahl von Modellen und Softwarelösungen. Eine gute Übersicht bietet hier der Leitfaden Modellierung verkehrsbedingter Immissionen der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), welche auf dem HBEFA (Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs) aufbaut. Unterschieden werden muss besonders zwischen zwei Grundtypen von Modellen. Erstens einer mathematischen Modellbildung, wie bei den Grundmodellen des Ensemble Modells des Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). Diese beruhen auf physikalischen und chemischen Gleichungen und Gleichungssystemen, welche im Prognoseprozess numerisch gelöst werden.

Bei empirischen Modellen hingegen wird ein mathematisch statistischer Zusammenhang zwischen Beobachtungen hergestellt, ohne dass dieser kausalen Ursprungs sein muss. Eine Herangehensweise ist die multiple lineare Regression. Besonderen Einfluss finden in diesem Modell Inversionswetterlagen und Niederschläge. Eine andere Herangehensweise sind neuronale Netze.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die MVV Energie AG als Mehrheitsbeteiligung der Stadt Mannheim ist Infrastrukturpartner der Stadt Mannheim und übernimmt in diesem Gebiet auch Funktionen und Dienstleistungen über den üblichen Versorgungsauftrag hinaus. Insbesondere im Bereich Smart City, was auch das Thema Verkehr einbezieht, ist die MVV die treibende Kraft innerhalb Mannheims. In diesem Zusammenhang existierte auch eine enge Zusammenarbeit mit den Fachbereichen der Stadt und der Stadtverwaltung. Zudem wurden im Zuge des Projektes MaVI, Konzepte mit dem lokalen Verkehrsverbund Rhein-Neckar, zur anreizbasierten Verkehrsbeeinflussung erarbeitet.

¹ Dümmer, Katharina (2021): Diesel-Fahrverbote spülen 1,6 Millionen Euro in die Kassen, veröffentlicht auf www.adac.de am 09.11.2021

2. Eingehende Darstellung

Die Projektziele wurden innerhalb des Projektrahmens erreicht. Dabei kam es zu keiner Überschreitung der bewilligten Projektausgaben. Die Erfolge, Ergebnisse und Verwertbarkeit von MaVI werden in den nachfolgenden Kapiteln im Detail vorgestellt. Die Echtzeitdaten können direkt auf dem Public MaVI Dashboard² oder dem Open Data Portal³ abgerufen werden.

2.1.1 Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung mit den Zielen

Die nachfolgende Tabelle zeigt die im Projekt definierten Meilensteine und wann diese abgeschlossen wurden. Alle Meilensteine wurden innerhalb der Projektlaufzeit erreicht. Bei Arbeitspaket 1 handelt es sich um das Projektmanagement, deshalb beginnt die Darstellung der Ergebnisse mit Arbeitspaket 2 (nachfolgend AP abgekürzt).

Nr.	Meilenstein	abgeschlossen am
MS-1.0	Projektstart	Februar 2020
MS-2.1	Standorte festgelegt	März 2020
MS-2.2	Plan für Testbetrieb vorliegend	Juni 2020
MS-2.3	Plan Evaluation vorliegend	Juni 2020
MS-2.4	Go für Umsetzung	Juli 2020
MS-3.1	Prototyp eines smarten Sensors ist funktionsfähig	August 2020
MS-3.2	Bau smarte Sensoren abgeschlossen	Mai 2021
MS-3.3	Installation der smarten Sensoren abgeschlossen	Februar 2022
MS-3.4	Dashboard implementiert	November 2020
MS-3.5	Inbetriebnahme des Gesamtsystems	März 2021
MS-3.6	Erste Echtzeitempfehlung implementiert	April 2022
MS-4.1	Start Testbetrieb	Januar 2021
MS-5.1	Ergebnisvorstellung	Juli 2022
MS-6.1	Projekt Dokumentation	April 2022
MS-6.2	Projektdaten werden Open Data gestellt	Mai 2022
MS-6.3	Zusammenfassung und Ausblick	Juli 2022

Tabelle 1: Meilensteine des Projektes

² <https://dashboard.mvvs martcities.com/#/no2-prognose>

³ <https://www.mvv.de/smart-cities/mavi>

2.1.2 Konzeption und Planung (AP 2)

Ziel ist eine detaillierte Planung eines tragfähigen und erfolgversprechenden Vorgehens zur Umsetzung des geplanten MaVI Vorhabens. Dazu gehört die Auswahl von Hardware und Software, sowie der benötigten weiteren Komponenten, wie z.B. Cloudservices, Interfaces und APIs.

Standortplanung und Sensorauswahl (AP 2.1)

Die Festlegung der 19 Standorte (siehe Abbildung 1) für das Verkehrsmonitoring erfolgte gemeinsam mit der Stadt Mannheim. Hierfür wurden Hauptverkehrsknotenpunkte primär in der Mannheimer Innenstadt identifiziert. Diese umfassen die Brücken in die Nachbarstadt Ludwigshafen über dem Rhein, das Hafengebiet, die Zufahrt in die Innenstadt über die drei Hauptbrücken des Neckars sowie die Straßen Richtung Autobahn im Osten. Anstelle eines 20. Standorts wurde Kamera MaVI020 als mobile Version zu Testzwecken im Projekt eingesetzt und nicht fest verbaut.



Abbildung 1: Standorte zur Fahrzeugerkennung entlang des „Mannheimer Rings“ im innerstädtischen Bereich

Konzeption der IT-Architektur (AP 2.2)

Die Abbildung 2 (bzw. Anhang 2) zeigt das Architekturmodell des Front- und Backends. Ausgewertete Daten und Rohdaten der Erfassung werden über Datenpakete (Text) an einen Server geschickt. Unter anderem sind die Anzahlen der in einem Zeitraum von 10 Minuten klassifizierten Fahrzeuge sowie ereignisbasierte Live-Fahrzeugdaten enthalten. Über diesen Kanal ist es nicht möglich Einstellungen an der Kamera vorzunehmen oder andere Daten anzufragen. Die Sicherheit bei der Verkehrsdatenübertragung vom Feld in das Backend wird gewährleistet, indem die Remote-Verbindung nur über eine TLS verschlüsselte VPN Verbindung gewährt wird, in der Clients sich über Zertifikate authentifizieren müssen. Darüber hinaus verfügt die Mobilfunkverbindung zur Datenübertragung über keine öffentliche IP-Adresse. Bei einer zustande gekommenen VPN Verbindung müssen somit Logindaten angegeben werden, um Einstellungen an der Kamera vorzunehmen. Zusätzlich wurden Schnittstellen zu weiteren Datenbeständen wie der Umweltdatenbank LUBW implementiert.

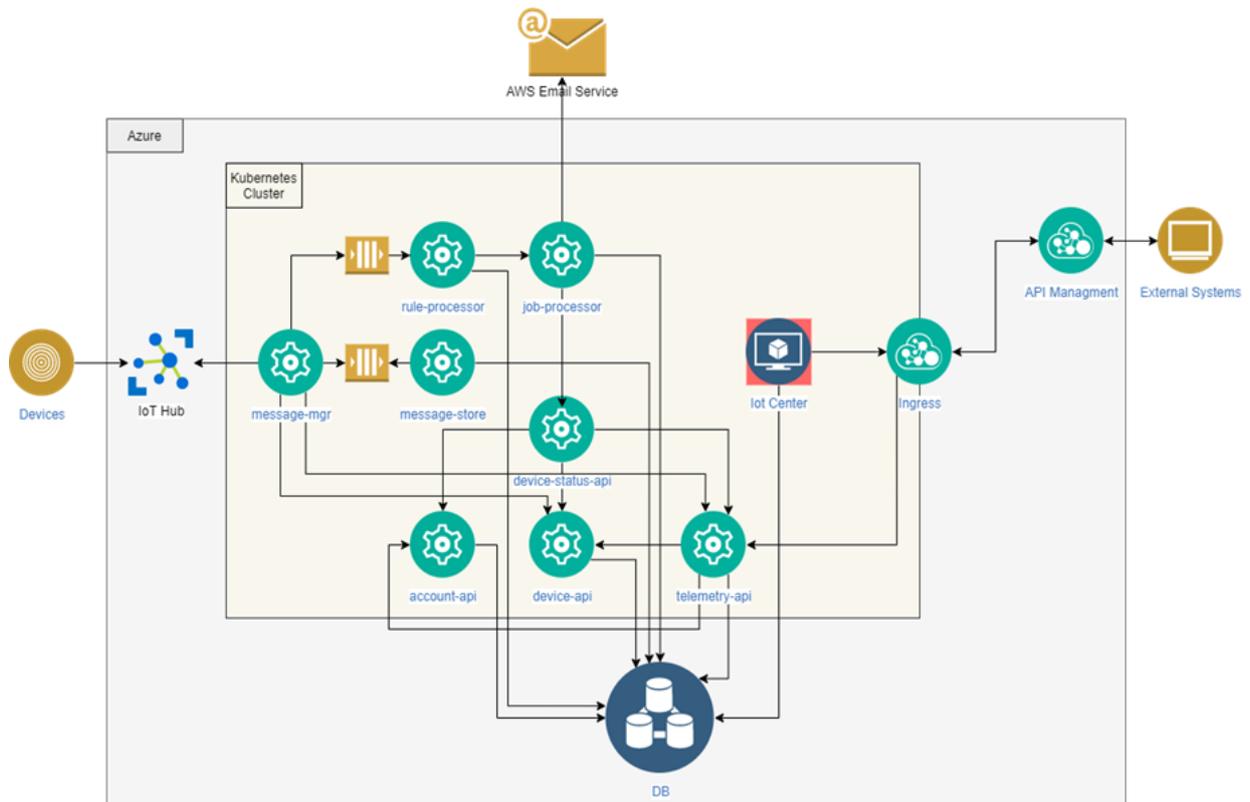


Abbildung 2: Architekturschaubild IoT-Center - Frontend und Backend

Planung des Betriebs und Evaluation (AP 2.3)

Die ersten Versuche Verkehrsdaten zu erheben erfolgten mit optischen Sensoren an der BBC-Brücke. Es kam zu anfänglichen Problemen, die mit der verwendeten Sensortechnik im Zusammenhang stand. Starke Sonneneinstrahlung und Schlagschatten führten zu einer geringeren Erkennungsrate. Das Problem ist hierbei, dass der Kontrast zwischen Fahrzeugen und dem Schatten zu gering wird, sodass einige Fahrzeuge nicht erkannt oder falsch klassifiziert werden. Auch das Auftreten von Nebel, Regen, Schnee oder sonstigen, die Sicht einschränkenden, Wetterlagen verschlechtern die Fahrzeugerkennung. Nachts stellte der Sensor aufgrund der Scheinwerferblendung automatisch die Belichtung neu ein. Dies führte jedoch dazu, dass die Fahrzeugklassifizierung nicht mehr zuverlässig funktionierte.

Um diesen Problemen entgegenzuwirken, wurde der WDR (wide dynamic range) aktiviert, sodass eine Anpassung an veränderte Lichtverhältnisse automatisch und zuverlässiger funktioniert. Die maximalen und minimalen Belichtungszeiten wurden begrenzt, damit Scheinwerferblendungen und direkte Sonneneinstrahlung keine Über- bzw. Unterbelichtung des Bildes verursachen.

Aufgrund der Nachteile optischer Sensoren wurden Tests mit einer anderen Technologie, dem Infrarot, durchgeführt. Die Wärmebildkamera hat den Vorteil, dass ihre Objekterkennung witterungsunabhängig ist. Ein weiterer Nebeneffekt, Merkmale wie Gesichtszüge und Kennzeichen sind nicht erkennbar (siehe Seite 15 Abbildung 10). Aus diesen Gründen wurde sich für die Wärmebildtechnologie im weiteren Projektverlauf entschieden.

Konzeption des Prediction-Modells (AP 2.4)

Aufgrund der Abhängigkeit des Verkehrs auf die Schadstoffe Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid wurde im ersten Schritt jeweils ein Verkehrsprognosemodell für den jeweiligen Prognosezeitpunkt erstellt und anschließend die Schadstoffprognosemodelle (siehe Abbildung 3). Dabei soll dieses gestufte Vorgehen die Prognoseergebnisse der Luftschadstoffe verbessern und den Einfluss einer Verkehrsreduktion leichter abschätzbar machen. Durch das Aufteilen in einzelne Modelle für jeden Zeithorizont ist das Aufsummieren von Fehlern bei fortschreitendem Prognosezeitpunkt verhindert und eine Korrektur beziehungsweise Optimierung einzelner Prognosen wird möglich.

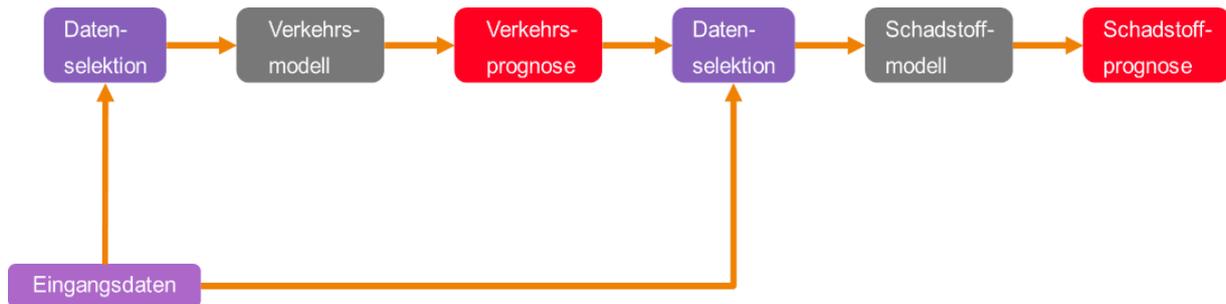


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Prognoseprozesses

Auswahl von Instrumenten zur Verkehrsbeeinflussung (AP 2.5)

In einem Workshop mit Mitarbeiter:innen der MVV Energie, bestehend aus Marketingreferenten, Sozialwissenschaftlern, Datenschutzbeauftragten und dem Fuhrparkmanagement wurden im Frühjahr 2020 Zielgruppen und Maßnahmen zur aktiven Beeinflussung des Individualverkehrs erarbeitet und diskutiert. Es fanden zusätzlich Gespräche mit Vertretern der Verkehrsbetriebe statt. Die wichtigsten Ergebnisse sind in Abbildung 4 kurz zusammengefasst.

Zielgruppe: Pendler:innen des Individualverkehrs	
Kanäle um Pender:innen zu erreichen: <ul style="list-style-type: none"> • Einbindung des Stadtmarketings und über die städtische Bürgerapp • Einbindung von Unternehmen • Einzelhandel • Social Media und Radio • Webseite der Veranstalter von Großevents im Mannheimer Stadtgebiet (z.B. Stadion) • Tourismusbüro • Themenspezifische Workshops • Anzeige-/Verkehrstafel im Stadtgebiet 	Anreizsysteme: <ul style="list-style-type: none"> • Vergünstigte/Flexible Tickets für den ÖPNV bei zu erwartender hohen Schadstoffbelastung für den kommenden Tag • Gratis Car Sharing und ÖPNV Nutzung bei KFZ Verzicht über ein gewisses Kontingent • Kampagnen wie „Spar dir dein Auto“ • Gamification durch Zielsetzung und Belohnung z.B. Punkte sammeln in Kooperation mit lokalen Unternehmen • Homeoffice bei zu erwartenden hohen Schadstoffbelastungen • Parkraummanagement (Optimierung der Parkplatzsuche durch Verkehrsleittafel/App)

Abbildung 4: Auswahl geeigneter Instrumente zur anreizbasierten Verkehrsbeeinflussung

Simulation der Stickstofffoxid Beeinflussung (AP 2.6)

In Anhang 1 sind die bewerteten Ergebnisse der Stickstofffoxid (NO₂) und Stickstoffmonoxid (NO) Modelle anhand der Simulation mit einem zufälligen Datensample aus den Trainingsdatensets zu sehen. Sie wurden hinsichtlich der Kennwerte des Mittleren Quadratischen Fehlers (MSE) und dessen abgeleiteten Wertes (RMSE) sowie des Mittleren Absoluten Fehlers (MAE) analysiert. Um das Abschneiden der Modelle im direkten Vergleich zu evaluieren, wurde nach dem Onlineschalten die Modellgenauigkeit anhand von Livedaten analysiert.

Zu erkennen ist, dass vor allem die Kurzzeitprognosen eine hohe Genauigkeit aufweisen. Zudem sind bei der NO₂- Vorhersage die Werte in der Simulation besser als in der Realität. Bei der NO-Vorhersage war dies genau umgekehrt.

2.1.3 Umsetzung (AP 3)

Ziel ist die Erstellung und Inbetriebnahme eines funktionsfähigen Systems. Es erfolgt die Umsetzung des realen Aufbaus aus AP 2 Konzeption. Nach Abschluss dieser Projektphase sind die Wärmebildkameras installiert und in Betrieb genommen. Zusätzlich sind die IT-Systeme implementiert und es kann mit der Datenauswertung begonnen werden.

Entwicklung, Bau und Installation der Sensoren (AP 3.1 und AP 3.2)

Die ersten Sensoren basierten auf optischer Objekterkennung. Ein Problem war unter anderem, dass Lichtkegel, welche durch die Scheinwerfer vor fahrenden Autos auf der Straße zu sehen sind als Teil des Fahrzeugs erkannt wurden und somit PKW deutlich zu lang erfasst und als Schwerlastverkehr klassifiziert wurden. Aufgrund der bereits im Arbeitspaket Planung des Betriebs genannten Nachteile optischer Sensoren, die nur bedingt behoben werden konnten, erfolgte der Umstieg auf Wärmebildkameras. Da es am Markt bereits Wärmebildkameras mit intelligenter Klassifizierung gab, wurde von einer umfänglichen Eigenentwicklung abgesehen. Jedoch mussten die beschafften Wärmebildkameras noch erweitert werden um einen Router zur Datenübertragung, einem PoE-Injektor, Montagmaterial zur Befestigung an Ampeln oder Laternen sowie einem wasserdichten Gehäuse. Die Wärmebildkamera erfasst dabei nachfolgende Daten aus dem Feld. Anhand dieser Messungen erfolgt eine Aufteilung in Fahrzeugklassen (siehe Abbildung 5).

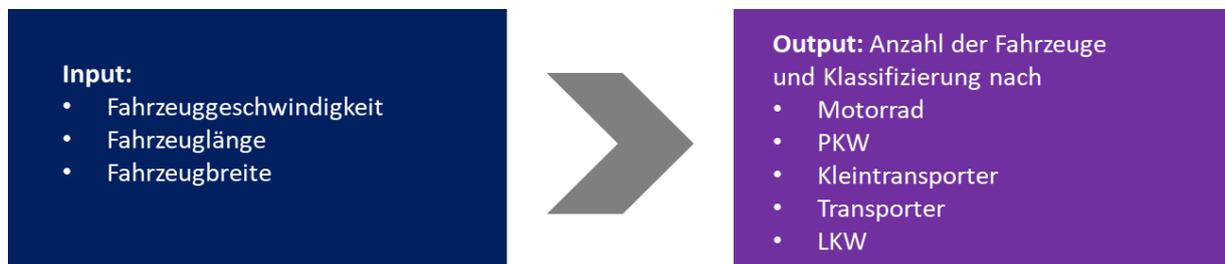


Abbildung 5: Datenerhebung im Feld und Klassifizierung

Darüber hinaus wurde eine Kalibrierung der Kameras und Netzwerkkomponenten vorgenommen, um die Klassifizierung und Spurzählungen über die Werkseinstellungen des Herstellers hinaus zu optimieren. Ferner wurden auch die virtuellen Parameter Aufbauhöhe und Spurbreite zur Erzielung einer besseren Messgenauigkeit angepasst. Es erfolgte zudem eine Anpassung der Zuordnung von Kameras und IPs im VPN. Die Zugriffsrechte und Zugriffsabläufe auf Router, Kameras und den anderen Komponenten wurden vereinheitlicht. Ferner wurde eine automatische Benachrichtigung im System bei Kamera-/Hardware-Ausfall implementiert. Nach 30 Minuten erfolgt eine Warnung und nach 2 Stunden ein Alarm.

Implementierung und Deployment des IT-Backends (AP 3.3)

Die Daten aus dem Feld (Fahrzeugklasse und Anzahl) werden an das Backend gesendet und dort aufbereitet. Die Daten werden an die MVV-interne API geschickt und einheitlich formatiert in einer NoSQL Datenbank gespeichert. Da die Daten je Kamera ans Backend gesendet werden, werden diese alle 10 Minuten je Fahrzeugklasse aggregiert, um spätere Analysen und Darstellungen zu vereinfachen. Des Weiteren werden die Daten der LUBW Umweltstation über die externe Schnittstelle stündlich importiert und für die weitere Verwendung persistiert.

Implementierung und Deployment des Visualisierungsdashboards (AP 3.4)

Im entwickelten Frontend wurden für die 1. Version des Dashboards (siehe Abbildung 6) die Fahrzeugdaten wie folgt dargestellt.

- Kombination der Fahrzeugdaten mit stündlichen Umweltdaten (NO₂, O₃, PM10, SO₂), die vom LUBW FTP Server bereitgestellt werden, zur ersten optischen Verknüpfung der beiden Datenquellen
- Verschiedene Aggregationsmethoden sowie Auswahl der Sensor-Standorte zur detaillierteren Analyse
- Oberhalb des Graphen ist eine Anpassung der Datenaufösung und des Zeitraums möglich, unterhalb können unterschiedliche Datenreihen aus- / abgewählt werden
- Die Farbskala indiziert die Bedeutung der erfassten Umweltdaten (Liniendiagramm)

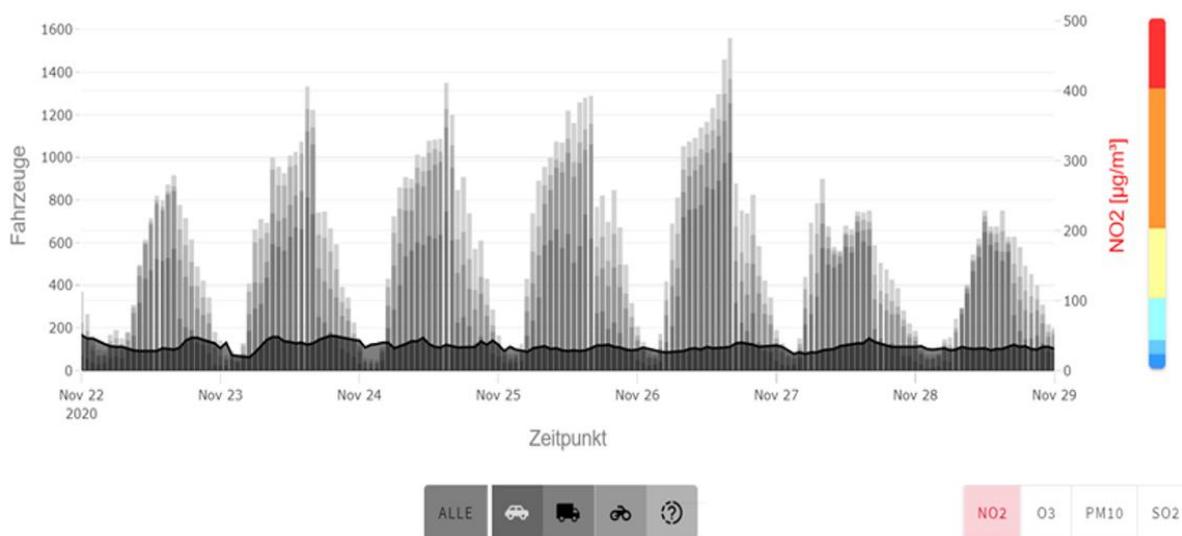


Abbildung 6: Dashboard zur Anzeige der Fahrzeugdaten und Gegenüberstellung zu Umweltdaten

In einer Weiterentwicklung der Dashboards können die Sensordaten auch auf Karten dargestellt werden (siehe Abbildung 7). Ebenso können die Daten in feinerer Auflösung angezeigt werden (bis zu 60 Sekunden). Im oberen Abschnitt des Dashboards wurden die Prognosen der NO₂-Werte ergänzt (siehe Ausschnitt Abbildung 8).

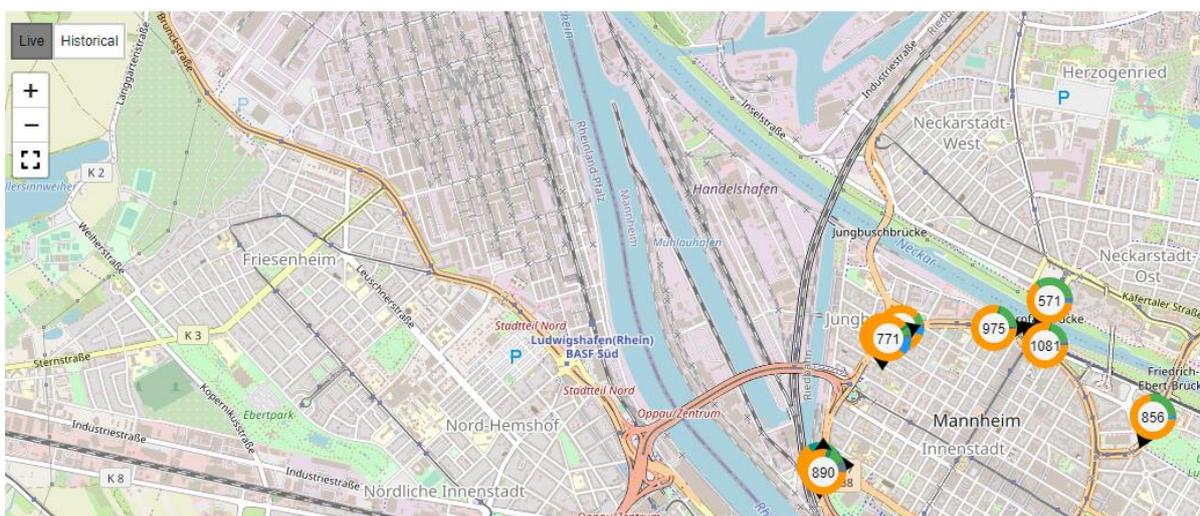


Abbildung 7: Mobilitätskarte zeigt die Anzahl der klassifizierte Fahrzeuge in sowohl in Echtzeit als auch historisch

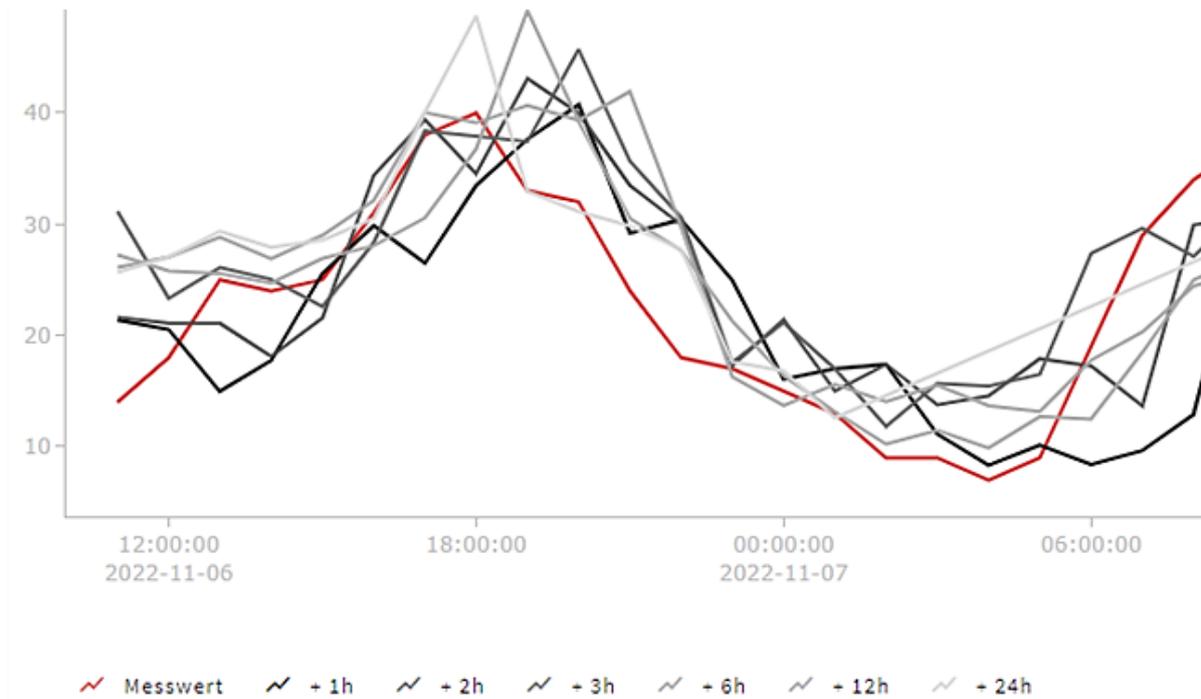


Abbildung 8: Unterschiedliche NO₂ Prognosen (grau) in Gegenüberstellung mit den realen Messwerten (rot)

Implementierung des Prediction-Systems (AP 3.6)

Mit den erstellten Modellen werden die Messwerte NO₂, NO und PM_{2,5} der Umweltmessstation LUBW DEBW098 prognostiziert, da diese verkehrsnahen Messstation einen guten Überblick über die zu erwartende Belastung mit Luftschadstoffen in der Innenstadt von Mannheim gibt. Für die Vorhersage der Messwerte werden Random Forest Modelle (Entscheidungswälder) verwendet, die mithilfe einer Datamining Software abhängig vom Vorhersagewert und dem Prognosehorizont flexibel erstellt und trainiert werden.

Die verwendete Software ermöglicht zudem die Optimierung der für den Prognosewert wichtigen Parameter und ermöglicht ein einfaches manuelles Nachtrainieren nach dem Zusammenstellen eines neuen Trainingsdatensatzes. Die Modelle können anschließend in ein Python Script exportiert und damit dauerhaft im System verwendet und kontinuierlich aktualisiert werden. Änderungen in den für das jeweilige Modell abhängigen Variablen müssen jedoch händisch angepasst werden. Die Prognosedaten werden anschließend in Zeitreihen gespeichert und können damit flexibel visualisiert werden.

Implementierung einer Echtzeitempfehlung (AP 3.7)

Zur Echtzeitempfehlung ist ein Public Dashboard (abrufbar Public MaVI Dashboard⁴) erstellt worden, welches den Prognose Höchstwert im 12- und 24-Stundenzeitraum in einem jeweils eigenen Tachochart anzeigt (siehe Abbildung 9). Zusätzlich wird der aktuelle Messwert angezeigt und über das Ampelschema der Handlungsbedarf symbolisiert. Die Farben gelb und rot sollen ein Signal zum Überdenken des eigenen Verhaltens geben wie beispielsweise vielleicht doch das Fahrrad oder die Bahn, statt dem Auto, zu nutzen. Im unteren Bereich des Dashboards ist ein Liniendiagramm aller Prognosehorizonte und des aktuellen Messwertes dargestellt (siehe Abbildung 8 oben).

⁴ <https://dashboard.mvsmartcities.com/#/no2-prognose>

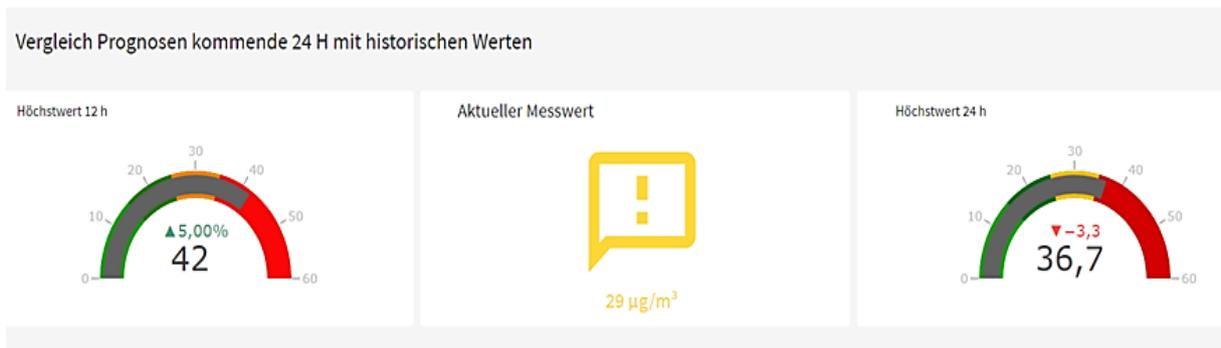


Abbildung 9: Ausschnitt Public Dashboard zur Stickstoffdioxid Prognose und Darstellung

2.1.4 Betrieb (AP 4)

Ziel ist die kontinuierliche lückenfreie Erhebung der Verkehrs- und Umweltdaten aus dem Feld. Diese Daten sollen alle in der Verkehrsplattform gespeichert werden, um weiter Analysen durchzuführen. Ebenfalls soll das entwickelte Prognosemodul zum Einsatz kommen. Schlussendlich sind die relevanten Daten, Prognosen und Ergebnisse Bürger:innen und Verkehrsplaner:innen verständlich aufbereitet zur Verfügung zu stellen.

Betrieb und Weiterentwicklung IT-Backend und Dashboard (AP 4.1 und AP 4.2)

Hierunter fallen die permanente automatisierte Überwachung und Wartung sämtlicher Frontend- und Backendsysteme. Dank Kubernetes (Open-Source-System zur Verwaltung von Container-Anwendungen) gibt es keine Downtime, da immer mehrere Instanzen von den Systemen vorhanden sind. Neue Funktionen werden als rolling release veröffentlicht, wodurch auch hier eine Einschränkung der Verfügbarkeit verhindert wird (keine Downtime). Die Daten aus den Datenbanken werden regelmäßig gesichert. Hierzu werden die Daten aggregiert, sodass Datenabrufe über größere Zeiträume schneller verfügbar sind.

Bei den Dashboards erfolgen ein kontinuierliches Monitoring, Wartung, Pflege und Performanceoptimierung. Zudem erfolgte regelmäßig die Fehlerbehebung und Implementierung neuer Features sowie Anpassungen an Erkenntnisse aus dem Produktivbetrieb des Systems. Zudem wurden weitere Visualisierungsfeatures zur Version 1 im Laufe des Projektes entwickelt. Die neuen Darstellungen unterstützen unter anderem eine Einordnung der Messwerte auf Skalen und eine visuelle Aufbereitung mit Symbolen, Statuskacheln und -ampeln.

Wartung und Entstörung der Sensoren und der Kommunikationsstrecke (AP 4.3)

Die Erkennungsgenauigkeit der einzelnen Fahrzeuge im Feld hängt stark davon ab, wie die Aufbauhöhe und Winkel angegeben und Zähllinien platziert werden. Eine deutliche Verbesserung der Klassifizierungsergebnisse konnte erzielt werden, indem zum Beispiel die Aufbauhöhe (im Kamera-Tool) angepasst wurde, bis die Länge und Breite der Fahrzeuge besser der realen Länge und Breite entsprach. Eine weitere Erhöhung der Genauigkeit konnte an einzelnen Kameras durch eine händische Nachzählung und Klassifizierung erreicht werden. Darauf aufbauend wurde ein Neuronales Netz trainiert. Jedoch stellten das Training und die Konfiguration des Neuronalen Netzes für alle Standorte einen so enormen Zeitaufwand dar, der nicht im Verhältnis zur verbesserten Genauigkeit stand. Aus diesem Grund wurde dies nicht weiterverfolgt. Während der Projektlaufzeit brachte der Hersteller der Wärmebildkameras ein neues Firmwareupdate heraus. Dieses Update führte ebenfalls zu Verbesserungen im Vergleich zur ursprünglichen Konfiguration.

Ein weiteres Problem war die Trennung von parallelen Spuren, sodass es besonders bei hohem Verkehrsaufkommen zur Detektion von kurzen und extrem breiten Fahrzeugen kam (z.B., wenn zwei Fahrzeuge direkt nebeneinander fahren, wurden diese als Kleintransporter klassifiziert). Eine Reduktion dieser Falschzählungen durch das Einführen einer Klasse für zwei parallele Fahrzeuge wurde jedoch nicht umgesetzt, denn auch hier brachte das Firmwareupdate Abhilfe.

Kontinuierliche Datenauswertung und Bereitstellung der Auswertung (AP 4.4)

Abbildung 10 zeigt wie die Wärmebildkamera die Verkehrsteilnehmer:innen am 18.10.2021 erfasst und klassifiziert. Die eingezeichneten Felder (1 bis 4) stellen die einzelnen Fahrspuren dar. Num gibt die Anzahl der bereits gezählten Fahrzeuge an. Sp (Speed) steht für die Fahrzeuggeschwindigkeit. Die Fahrzeugmaße werden angegeben in Länge (l) sowie die Breite (w). Die Fahrzeugmessung dient der anschließenden Einordnung in eine Klasse (C). Sowohl die Klassen als auch die gezählte Fahrzeuganzahl wird an die Datenbank übermittelt.

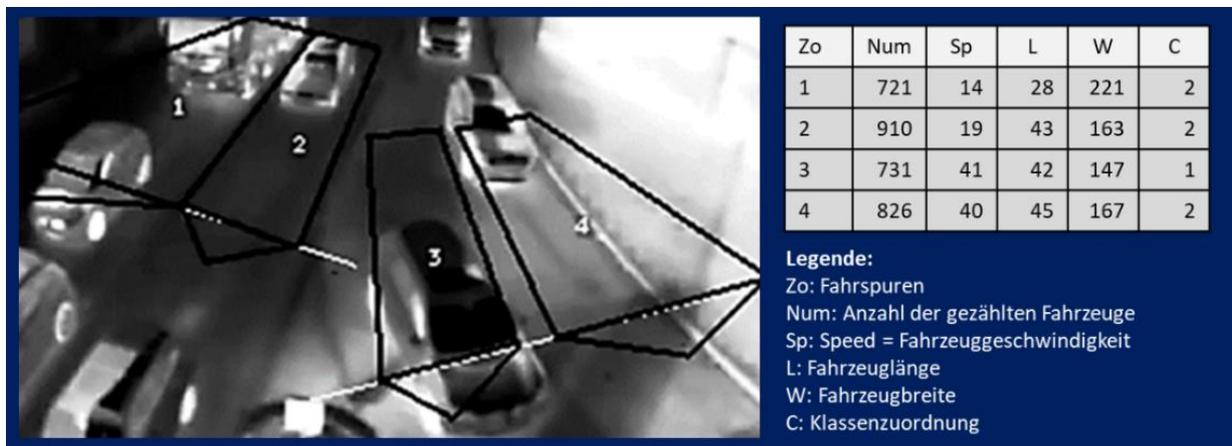


Abbildung 10: Aufnahme Wärmebildkamera und Klassifizierung am 18.10.2021

Datenanalyse hinsichtlich einer Verbesserung des Prediction-Modells (AP 4.5)

Neben den Daten der Verkehrskameras und der beiden Mannheimer LUBW Luftschadstoffmessstationen wurden Luftschadstoffprognosedaten des CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) (genauer Daten des Ensemble Modells), Wetterdaten von Open Weathermap sowie Wetterdaten einer eigenen Wettermessstation in die Analyse einbezogen. Die Datensätze wurden mittels statistischer Methoden auf Korrelationen und Häufigkeitsverteilung untersucht, um die Zusammenhänge zu verstehen und geeignete Variablen für die Vorhersage zu ermitteln.

Dafür wurde eine DataMining Software verwendet. Die Bedeutung der Variablen für die einzelnen Prognosewerte wurde damit bestimmt und die Modelle dahingehend angepasst. So konnte zum einen eine Überanpassung der Modelle verhindert werden und zum anderen kann der Einfluss neuer Datensätze und neuer Variablen auf ihre Bedeutung hin untersucht werden.

Kontinuierliche Prognose der Verkehrssituation (AP 4.6)

Den Luftschadstoffprognosen wurde eine Verkehrsprognose vorgeschaltet, um deren Genauigkeit zu erhöhen. Die Prognose basiert ebenso wie die Luftschadstoffmodelle auf Random Forest Modellen. Die verwendeten Variablen für die verschiedenen Prognosehorizonte sind identisch.

Es fließen ein:

- Das aktuelle Verkehrsaufkommen, welches dem 10 Minuten Intervall-Zählwert aller Kameras gemittelt und über eine Stunde gemittelt entspricht
- aktueller Monat
- aktueller Wochentag von Montag=0 bis Sonntag=6
- Minuten seit 0:00 Uhr UTC zum Prognosezeitpunkt
- aktuelle Lufttemperatur

2.1.5 Evaluation und Datenanalyse (AP 5)

Nach dem ersten Piloten am Standort BBC-Brücke soll bereits eine erste Erfolgskontrolle und Evaluation stattfinden. Ziel der Evaluation ist eine verständliche Darstellung der gewonnenen Erkenntnisse und eine Bewertung der durchgeführten Maßnahmen, um eine weitere Aufbereitung der Erkenntnisse und Daten für die Allgemeinheit zu ermöglichen.

Darlegung des Prediction-Modells (AP 5.1)

Die jeweiligen verwendeten Randomforest-Modelle basieren grundsätzlich auf den gleichen begrenzenden Parametern nämlich einer Anzahl von 50 Bäumen, deren Tiefe auf 20 Entscheidungsebenen begrenzt ist, sowie eine Mindestzahl von 50 Instanzen deren Mittelwert das jeweilige Ergebnis präsentiert. Auch die Variablenauswahl unterscheidet sich von Modell zu Modell.

Bei der NO₂ Vorhersage sind vor allem die Verkehrsprognosen relevant, wobei deren Einfluss mit steigendem Prognosehorizont abnimmt. Zudem haben auch die Vorhersagen des CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) für NO₂, NO und O₃ einen hohen Einfluss. Vor allem bei den kurzzeitigen Prognosen sind die historischen Werte der prognostizierten Messstationen sowie der Umweltparameter wie Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und Luftfeuchtigkeit von Bedeutung.

Die NO Prognose unterscheidet sich dazu vor allem hinsichtlich der stärkeren Abhängigkeit von den historischen Werten beider LUBW Messstationen. Auch die historischen mittleren Windgeschwindigkeiten erfahren bei diesen Prognosen eine hohe Bedeutung. Die CAMS Prognosen haben hauptsächlich bei den langen Prognosehorizonten eine Bedeutung wobei vor allem die O₃- Prognose wichtig ist.

Beim Feinstaub PM_{2,5} ist die Abhängigkeit der Feinstaubkonzentration vom Verkehrsaufkommen gering, weshalb ab einem Prognosehorizont von sechs Stunden auf diesen Wert in den Modellen verzichtet wurde. Auch der Einfluss des Windes ist in den langfristigeren Prognosen nicht zu erkennen. Darum wurde in den entsprechenden Modellen auch auf diesen verzichtet. Dahingehend sind diese Modelle hauptsächlich von den historischen Feinstaubwerten und den Prognosen des CAMS abhängig.

Erkennen und klassifizieren von Elektrofahrzeugen

Neben der standardmäßigen Klassifizierung nach offensichtlichen Merkmalen wie Länge und Breite zur Einordnung in eine Fahrzeugklasse wurde untersucht, ob es Möglichkeiten gibt auch zwischen Elektro- und Verbrennungsmotor unterscheiden zu können. Hier wurden Feldtests zum einen Mittels akustischen Signalen und zum anderen hinsichtlich Wärmesignaturen vorgenommen.

Im ersten Schritt wurde die Infrarot-Wärmesignatur eines Elektro- und Verbrennerfahrzeugs untersucht. Jedoch traten Effekte auf, die eine eindeutige Erkennung unmöglich machten. Zum einen sind Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor nicht von Elektrofahrzeugen zu unterscheiden, wenn diese mit kaltem Motor losgefahren sind und unmittelbar danach die Aufnahme erfolgt. Zum anderen können Elektrofahrzeuge, die in der Sonne standen, irrtümlicherweise für Verbrenner gehalten werden, da sich der Bereich um die Motorhaube stark erwärmen kann. Außerdem gibt es noch weitere Ausnahmen wie Plug-In Hybride oder Fahrzeuge mit Mittelmotor die zu falschen Klassifizierungen führen können.

Aus diesen Gründen wurde ein weiterer Test durchgeführt mit dem Ziel anhand akustischer Unterscheidungsmerkmale eine Klassifizierung vornehmen zu können. Hierzu wurden Tonaufnahmen von vorbeifahrenden Fahrzeugen aufgenommen und Spektrogramme erstellt (siehe Abbildung 11). Diese wurden miteinander verglichen, um Unterschiede feststellen zu können. Die Tonaufnahmen wurden in einer 30er Zone erstellt, da bei schnelleren Geschwindigkeiten die Abrollgeräusche der Reifen zu schwer verwertbaren Ergebnissen geführt haben. Jedoch kommt es häufig vor, dass durch die Geschwindigkeitsreduktion in der 30er Zone die Fahrzeuge mit Verbrennungsantrieb in die sogenannte Schubabschaltung (temporäre Unterbrechung der Kraftstoffzufuhr und Nutzung des Schwungs zur Fortbewegung) umschalten, wodurch sich Motorgeräusche stark verringern. Eine signifikante Unterscheidung war nur gegeben, wenn die Fahrzeuge stark beschleunigt haben, beispielsweise an einer Ampel. Jedoch funktioniert dies nur an wenig befahrenen einspurigen Ampeln und ist somit nicht tauglich für die mehrspurigen stark befahrenen Straßen an den Verkehrsknotenpunkten.

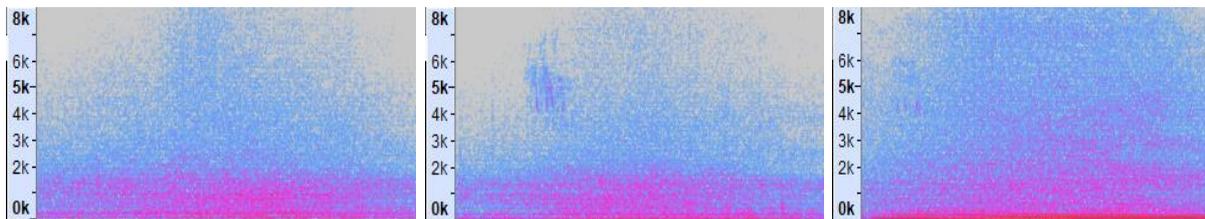


Abbildung 11: Spektrogramme zeigen, dass die Signaturen in einem sehr ähnlichen Frequenzbereich mit Ausnahme des beschleunigten Verbrenners liegen

(Bild 1: Elektromotor / Bild 2: Verbrenner / Bild 3: Verbrenner beschleunigt)

Bewertung von Maßnahmen zur Verkehrsbeeinflussung (AP 5.2 und AP 5.3)

Das Projekt MaVI ist zum Zeitpunkt der auftretenden Corona Pandemie im Februar 2020 gestartet. Die Corona Maßnahmen forderten zum einen strikte Kontaktbeschränkung und zum anderen die Vermeidung von Menschenansammlungen. Folglich war es nicht gestattet, Anreize zu schaffen Bus und Straßenbahn (ÖPNV) vermehrt zu nutzen. Zudem verzeichneten die Verkehrsbetriebe bereits vor Corona eine sehr hohe Auslastung an Pendler:innen mit dem ÖPNV. Aus diesen Gründen musste von der Maßnahme „anreizbasierte ÖPNV Tickets“ abgesehen werden. Jedoch wurde mit den über 52 Millionen verkauften 9 € Tickets durch die Bundesregierung ein noch nie dagewesener Anreiz für die Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln in den Monaten Juni, Juli und August 2022 gesetzt. Wie Abbildung 12 zu entnehmen ist, kam es im Juni gegenüber den Vormonaten April und Mai zu einem Rückgang erfasster Fahrzeuge von bis zu 15 %. Dies ist jedoch durch die Pfingstferien hauptsächlich zu begründen. Betrachtet man den ferienfreien Juli gegenüber April und Mai, so stellt man nur minimale Unterschiede fest.

Dies bestätigt auch die Studie des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt die über 2.500 Nutzer des 9 € Tickets in ganz Deutschland befragten. Primär nutzten die Bürger:innen das Ticket für Ausflüge, am Wochenende und zum Erledigen von Einkäufen. Lediglich 18 % nutzten das Ticket, um zur Arbeitsstätte zu fahren, darunter auch Nutzer, die vor dem 9 € Ticket bereits ein ÖPNV Ticket besaßen⁵. Daraus ist abzuleiten, dass die Bereitschaft auf ÖPNV zu Zeiten hoher Stickoxidbelastung umzusteigen, selbst wenn die Fahrt umsonst wäre, fast nicht vorhanden ist.

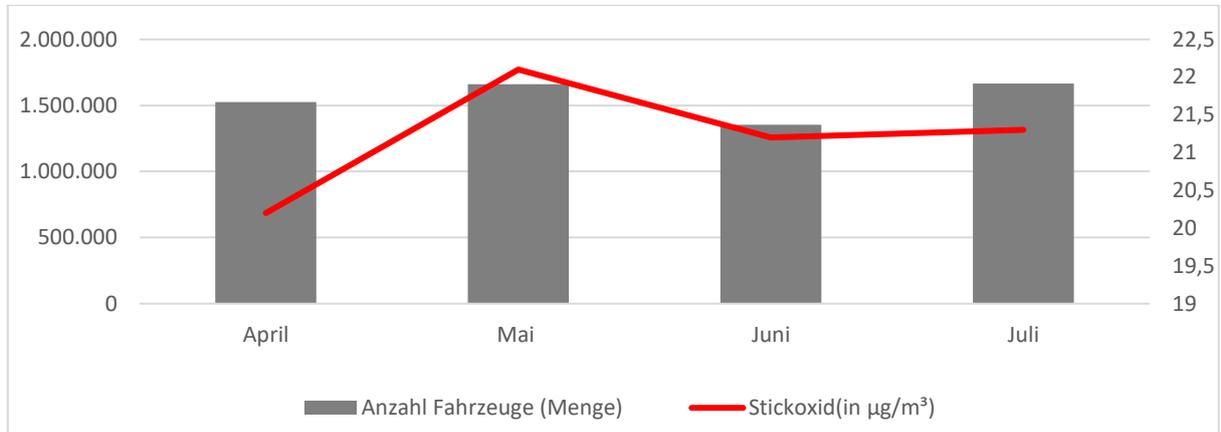


Abbildung 12: Auswirkungen 9 € Ticket auf den Verkehr in Mannheim ist minimal (Summe gezählte Fahrzeuge Zeitraum April bis Juli 2022 an wichtigen Verkehrsknotenpunkten in Mannheim)

Veränderung der allgemeinen Mobilität und der Luftqualität (AP 5.4)

Die Luftschadstoffbelastung mit Stickstoffdioxid (NO_2) lag vor Projektbeginn im Jahr 2019 im Jahresmittelwert bei $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und damit über dem Grenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Im Jahr 2020 lag dieser Wert mit $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (an derselben Messstation in Mannheim) unter der gesetzlichen Grenze von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Im Jahr 2021 kam es zu einer weiteren Verbesserung auf $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Im letzten Projektjahr 2022 (bis einschließlich November) lag der Jahresmittelwert bei $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Aufgrund der Tatsache, dass der Projektbeginn in der Pandemiezeit lag, gibt es keine Fahrzeugzählungen aus der Pre-Corona Zeit. Während der Projektlaufzeit kam es zu keinem vergleichbaren Ursprungszustand. Bedingt durch etablierte Homeoffice Regeln und Lockdowns, kann an dieser Stelle kein Vergleich zur historischen Entwicklung hergestellt werden. Die Veränderung der allgemeinen Mobilität wurde anhand des 9 € Tickets betrachtet. An dieser Stelle wird an die Analyse im vorherigen Kapitel und Abbildung 12 verwiesen.

Darüber hinaus bietet das in AP 2.4 näher beschriebene Luftschadstoff-Modell die Möglichkeit, den Einfluss der zukünftigen Verkehrsentwicklung auf die Luftschadstoffbelastung zu simulieren. Dafür kann eine gewünschte Verkehrssituation zusätzlich zu den Livedaten eingespielt werden. Es muss jedoch bedacht werden, dass die Modelle von vielen sich gegenseitig beeinflussenden Parametern abhängig sind. Folglich ist die Anpassung eines einzelnen Parameters im Modell nicht vorgesehen. Es kann jedoch von einer veränderten Ausgangslage im Modell, z.B. einer reduzierten Schadstoffsituation ausgegangen werden. Aus dieser Modellbildung ließe sich anschließend ableiten, ob die prognostizierte Luftbelastung mit reduziertem Verkehrsaufkommen realistisch erscheint. Ist dies der Fall, sollten Maßnahmen zur Verkehrsreduktion (siehe AP 2.5 und AP 5.2) ergriffen werden.

⁵ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V (2022): Sechste DLR-Studie zu Corona und Mobilität, S. 13 ff.

2.1.6 Vernetzung und Erweiterung (AP 6)

Die Darstellung der Projektergebnisse für eine breitere Öffentlichkeit dient der Gewinnung von Akzeptanz der Projektmaßnahmen sowie der Erstellung von zusätzlichen Schnittstellen und Sharing Optionen. Im Projekt wird ebenso die Transparenz in Bezug auf Öffentlichkeit gefördert. Deshalb sollen neben Projektergebnisse auch die Daten veröffentlicht werden (Open Data).

Darlegung des Verkehrsmodells (AP 6.1)

Die Anzahl der ermittelten den Verkehr bestimmenden Faktoren beläuft sich nur auf wenige exakt bestimmbare ortsunabhängige Parameter wie die Uhrzeit zum Prognosezeitpunkt, den aktuellen Wochentag und den aktuellen Monat. Bei den Kurzzeit-Prognosen ist zudem noch der Verkehr zum Zeitpunkt der Durchführung der Prognose relevant. Einen geringen Einfluss auf das Verkehrsgeschehen zeigt zudem noch die Lufttemperatur.

In der nachfolgenden Abbildung ist der Einfluss der einzelnen Variablen des Modells auf den Mittleren Absoluten Fehler (MAE) der Prognose zu erkennen. Da der größte Einfluss auf das Modell bei einem kurzen Prognosehorizont der Messwert des aktuellen Verkehrsaufkommens gegeben ist, wie in Abbildung 13 zu sehen, wurde als Schutz beispielsweise gegenüber Kameraausfall der Wert Verkehr als Mittelung des Verkehrsaufkommens aller Kameras realisiert. Dahingehend ist die Prognose als sehr stabil anzusehen. Mit zunehmenden Prognosehorizont werden die Uhrzeit und der Wochentag relevanter als das aktuelle Verkehrsaufkommen.

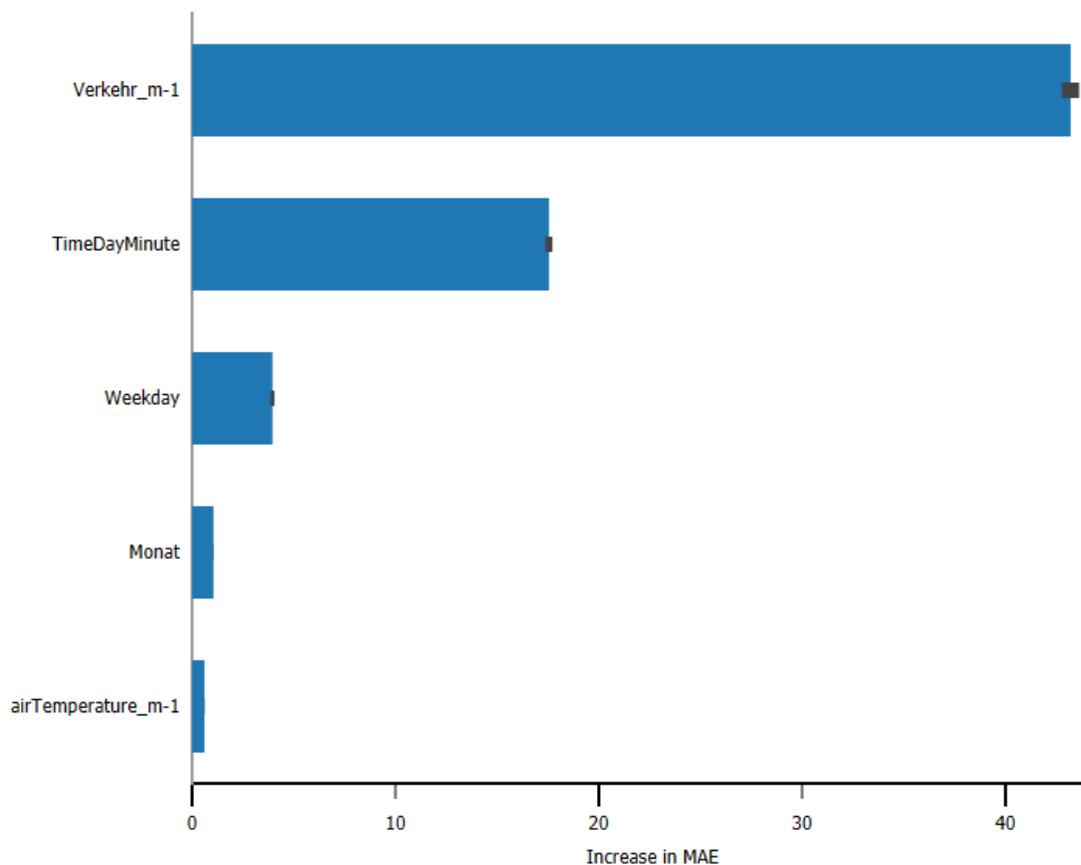


Abbildung 13: Ein Stunden Verkehrsprognose / Einfluss der Variablen auf MAE

Integration von Schnittstellen und Datenbereitstellung (AP 6.2 und AP 6.3)

Zuerst war angedacht das Open Source System CKAN zu verwenden, um die Daten öffentlich zugänglich zu machen. Nach ersten Tests mit dem System fiel allerdings auf, dass die Visualisierung der veröffentlichten Daten in kurzer Zeit nicht optimal umgesetzt werden kann. Da dies bei der Nutzung durch interessierte Bürger:innen aber im Vordergrund steht, wurde eine Alternative umgesetzt. Die Daten wurden zunächst in Form eines öffentlichen Dashboards im Internet zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus bietet die Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) Zugang zu, unter anderem in Mannheim erhobenen, Messungen von Luftschadstoffen an. Diese XML-Dateien werden einmal in der Stunde von der Verkehrsplattform abgerufen, indem ein Verbindungsaufbau und Abfrage auf dem LUBW FTP Server vorgenommen wird. Zusätzlich zum Public Dashboard werden die Daten über das Open Data Portal⁶ (Ausschnitt siehe Anhang 2) veröffentlicht.

Ausblick weitere Maßnahmen zur Reduktion von Luftschadstoffen (AP 6.4)

Die Erfahrungen der Vergangenheit zeigen, dass temporäre Einzelmaßnahmen wie beispielsweise das 9€ Ticket eher zu Mitnahmeeffekten als dauerhafter Verhaltensänderung führen. Selbst die zuletzt deutlich gestiegenen Spritpreise haben zumindest in Mannheim zu keiner Reduktion des Verkehrsaufkommens geführt. Erforderlich ist daher ein Bündel verschiedener Maßnahmen, das an unterschiedlichen Punkten ansetzt. Zur Entspannung des Verkehrsaufkommens während der Stoßzeiten sollte weiterhin durch eine intelligente Verkehrsführung versucht werden, stockenden Verkehr möglichst zu vermeiden. Wichtig sind weiter sogenannte nicht-investive Maßnahmen zur Beeinflussung des Mobilitätsverhaltens und des Verkehrsgeschehens. In einem ersten Schritt sollte den einzelnen Bürger:innen das Problem der Schadstoffbelastung durch städtischen Individualverkehr deutlich vor Augen geführt werden. Um dem Einzelnen nachhaltige Verkehrsmittel ans Herz zu legen, sollte verdeutlicht werden, dass jeder Einzelne von uns durch sein Verhalten und seine Gewohnheiten das Verkehrsaufkommen und damit verbunden die Schadstoffbelastung erheblich beeinflusst. Diese Kommunikation sollte über verschiedene Informationskanäle und möglichst zielgruppengerecht erfolgen bei MaVI geschieht dies über das frei zugängliche Dashboard. Die reine Informationsvermittlung kann durch befristete Aktionen zu nachhaltiger Mobilität, wie beispielsweise das bereits seit 2018 in Mannheim praktizierte Stadtradeln, unterstützt werden. Zugleich sollte vor allem der Radverkehr in Mannheim entsprechend des 21-Punkte-Programms weiterhin attraktiv gestaltet werden. Bei diesem wird vor allem eine Öffnung verschiedener Straßen für den Radverkehr und ein Ausbau des Radnetzes angestrebt.

2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Mit der Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft wurden strenge Grenzwerte für Luftschadstoffe festgelegt. Vor Projektbeginn 2020 wurde der Grenzwert für Stickoxide an der Messstation Mannheim-Friedrichsring überschritten. Somit bestand akuter Handlungsbedarf. Die Umsetzung der Verkehrszählung und der Verkehrsplattform war mit technischen und wirtschaftlichen Risiken verbunden. Dies ist unter anderem dadurch zu begründen, dass die eingesetzte Technik zur Verkehrszählung und Klassifizierung relativ neu war und folglich keine Langzeitstudien vorlagen. Darüber hinaus setzten auch andere Städte des Förderprogramms vergleichbare Sensoren und Wärmebildkameras ein. Folglich waren relevante Aspekte des Projektes noch ergebnisoffen und somit risikobehaftet.

⁶ <https://www.mvv.de/smart-cities/mavi>

MVV hat durch ihren Eigenanteil am Projekt kein wirtschaftlich positives Ergebnis erzielt. Darüber hinaus wurden weder weitere Drittmittel beantragt bzw. genutzt noch war das Vorhaben MaVI Gegenstand weiterer Förderprogramme. Die Projektrealisierung diente einem gesellschaftlichen Anliegen öffentlichen Interesses und war folglich auf die Förderung angewiesen. Die durchgeführten Arbeitsschritte und die dafür aufgewandten Ressourcen waren angemessen und notwendig. Insbesondere wurde eine Verkehrszählung und Klassifizierung etabliert, ein Prognosemodell entwickelt und über Public Dashboards Anreize für Verhaltensänderungen gesetzt. Die festgelegten Ziele gemäß Bewilligung wurden somit erreicht. Darüber hinaus wurden nicht alle beantragten Mittel verausgabt. Wie in Kapitel 2.2 begründet, haben die geringeren Ausgaben keine negativen Auswirkungen auf die Projektergebnisse.

2.3 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Aktuelle und historische Daten bilden die Grundlage für eine Vielzahl von Anwendungsfällen. Die Verkehrsdaten, Klassifizierungen sowie die Prognosedaten bilden die Basis für wiederkehrende Planungsprozesse zum Nahverkehrsplan, Luftreinhalteplan, Lärm-minderungsplan und Klimaschutzplan. Für Verkehrsplaner:innen der Stadt sind diese Daten und Modelle in einer entsprechenden Verkehrstransparenzplattform aufbereitet. Darüber hinaus bietet die Verkehrstransparenzplattform diverse Analyse-, Prognose- und Visualisierungsfunktionen. Für die Pendler:innen wurde ein vereinfachtes, anschauliches Dashboard geschaffen, um die wichtigsten Informationen und den Handlungsbedarf schnell vermitteln zu können ohne notwendige Fachkenntnisse. Hierfür wurde u.a. eine Tacho-Anzeige mit einer Farbskala gewählt, die auf einen Blick zeigt, ob Grenzwerte der Luftschadstoffe überschritten werden. Dieses Dashboard zeigt darüber hinaus Prognosedaten und kann modular zukünftig auch erweitert werden. Das Dashboard wurde mobil friendly gestaltet, um auf eine zeit- und kostenaufwendigere App Entwicklung verzichten zu können.

Die Stadt Mannheim ist darüber hinaus Teil der Modellprojekte Smart Cities des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. Ein Teil der Smart City Strategie und Umsetzungsmaßnahmen stellt der Mobilitätssektor dar. Deshalb werden die in MaVI erschlossenen Standorte und die Plattform mit integrierten Analyse- und Prognosemodellen von MVV Energie weiterbetrieben und der Stadt zur Verfügung gestellt. Durch die Zusammenarbeit der MVV mit anderen Stadtwerken und Kommunen in ganz Deutschland wäre es möglich, dass Lösung auch über Mannheim hinaus zu verbreiten. Dazu dient auch die neue Gesellschaft sMArt City Mannheim GmbH.

2.4 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit kam es zu einem Austausch mit Hamburg. Diese setzten ebenso auf die Wärmebildtechnologie mit ähnlichen Herausforderungen. Zur Verbesserung der Messgenauigkeit wurden einige Lösungsansätze aus dem Projekt MaVI vorgestellt. Ein weiterer Austausch fand mit der bergischen smart mobility statt. Diese testeten die LiDAR Sensorik für intelligente Verkehrssteuerung in Solingen. Jedoch ist die Technologie noch nicht ausgereift genug. Die NaKoMo Veranstaltungen gaben zusätzlich einen Überblick über die einzelnen Projekte. MVV nahm jedes Jahr teil und hielt Vorträge.

Zusammenfassend ergibt sich aus den Gesprächen und Recherchen, dass es keinen signifikanten technologischen Vorsprung zu vergleichbaren Techniken der Verkehrszählung gibt. Anreize auf andere öffentliche Verkehrsmittel umzusteigen, wurden über den Bund flächendeckend mit dem 9 € Ticket umgesetzt, jedoch führte diese Maßnahme in Mannheim zu keiner signifikanten Reduktion des Individualverkehrs. Es bleibt abzuwarten, wie das geplante 49 € Ticket von den Pendler:innen angenommen wird.

2.5 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Pressemitteilungen:

- Stadt Mannheim (2020): Pressemeldung – Verkehrszählung Kurpfalzbrücke
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2020): Digitalisierung kommunaler Verkehrssysteme, Seite 26-27
- MVV Smart Cities bei LinkedIn (2022): Erklären! Beteiligen! Ermöglichen! Im Dialog zu einer neuen Mobilitätskultur
- MVV Smart Cities LinkedIn Post (2022): Mobilität neu denken
- MVV Smart Cities LinkedIn Post (2022): Smarte Verkehrsplanung

Vorträge auf Veranstaltungen:

- NaKoMo Workshop (20.10.2021): Projektvorstellung MaVI – ein Vorhersagemodell für die Emission des Individualverkehrs und deren gezielte Beeinflussung
- NaKoMo Workshop (09.11.2022): Vorstellung Projektergebnisse MaVI Mannheimer Verkehrstransparenzplattform für den Individualverkehr

Projektseiten:

- Projekthomepage: Mannheimer Verkehrstransparenzplattform - MVV Energie AG
- MaVI Dashboard: <https://dashboard.mvvsmartcities.com/#/no2-prognose>

3. Erfolgskontrollbericht

Der nachfolgende Erfolgskontrollbericht von MaVI beinhaltet die Projektbeiträge zu den förderpolitischen Zielen. Zudem werden die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse zusammengefasst und dabei auch auf Ergebnisse eingegangen, die zu keiner Lösung geführt haben. Darüber hinaus wird auch der Verwertungsplan erläutert.

3.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms

Das Projekt MaVI ist Teil des Förderprogramms Digitalisierung kommunaler Verkehrssysteme des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur und erfüllt die drei Schwerpunkte der Förderrichtlinie:

Datenerhebung und Bereitstellung:

Mittels Wärmebildkameras werden an wichtigen Knotenpunkten Fahrzeuge gezählt und klassifiziert. Zusätzlich werden Umweltdaten zum einen selbst erhoben und zum anderen Schnittstellen zu weiteren Datenquellen wie der LUBW hergestellt. Alle Daten werden über eine gesicherte Kommunikationsinfrastruktur in der projektspezifischen Verkehrstransparenzplattform gespeichert und dort weiterverarbeitet. Für die Allgemeinheit wurde ein Public Dashboard implementiert. Im Sinne der Open Data Policy sind die Verkehrsdaten auch auf dem Open Data Portal der Smart City Mannheim bereitgestellt⁷.

Verkehrsplanung und Verkehrsmanagement:

Auf Basis der Verkehrsdaten in Form von Fahrzeuganzahl und -klasse sowie anhand des Prediction-Modells können Verkehrsplaner:innen das Verkehrsmanagement verbessern und sind befähigt vorausschauend Maßnahmen zur Reduktion von Luftschadstoffen einzuleiten.

Automation, Kooperation und Vernetzung:

Die Fahrzeugerfassung und anschließende Klassifizierung erfolgen automatisiert mittels einer Softwarelösung als Bestandteil der Wärmebildkamera. Zudem wurde das selbst entwickelte Prediction-Modell in die Verkehrstransparenzplattform implementiert. Die in MaVI erschlossenen Standorte und die Plattform mit integrierten Analyse- und Prognosemodellen wird von MVV Energie weiterbetrieben und der Stadt zur Verfügung gestellt.

3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens

Die Wärmebildkameras haben sich als geeignete Technologie für die Zählung und Klassifizierung des Individualverkehrs etabliert. Diese Technologie hat den Vorteil, dass sie witterungsunabhängig ist und keinerlei personenbezogene Informationen wie Nummernschilder oder Gesichter erfasst bzw. darstellt. Insgesamt 19 Standorte im Innenstadtbereich von Mannheim wurden damit ausgestattet. Die Daten aus dem Feld werden alle 10 Minuten mittels einer TLS verschlüsselte VPN Verbindung an die Verkehrstransparenzplattform gesendet und dort weiterverarbeitet. So wird sichergestellt, dass keine Einstellungen an der Kamera von unbefugten Dritten vorgenommen oder Daten abgefragt werden können. Die Entwicklung des Prognose Modells der Luftschadstoffe basiert auf Random Forest Modellen, die mithilfe einer Datamining Software abhängig vom Vorhersagewert und dem Prognosehorizont erstellt und trainiert wurden.

⁷ Zugangslink zum Public Dashboard und der Open Data Plattform befinden sich auf der Projektwebseite unter <https://www.mvv.de/smart-cities/mavi>

Die Luftschadstoffprognosen wurden für 12 und 24 Stunden in der Zukunft angelegt. Dieser Zeitvorsprung versetzt Verkehrsplaner:innen in die Position rechtzeitig Maßnahmen zur Vermeidung einer Grenzwertüberschreitung einzuleiten. Wie die Analyse der Einführung des 9 € Tickets zeigt, reduzierte sich das Verkehrsaufkommen kaum durch diese Anreizmaßnahme. Nachweislich nutzten nur 18 %, inklusive derjenigen die bereits vorher ein Jobticket besaßen, das 9 € Ticket, um zur Arbeit zu fahren.

Die Luftschadstoffbelastung betrug vor Projektbeginn 2019 im Jahresmittelwert 42 µg/m. Während der Projektlaufzeit lag diese deutlich unterhalb des Grenzwertes von 40 µg/m. Aufgrund dessen, dass der Projektbeginn in der Pandemiezeit lag, gibt es keine Fahrzeugzählungen aus der Prä-Corona Zeit. Jedoch ist anzunehmen, dass u.a. etablierte Homeoffice Regelungen, ein Anstieg der Digitalisierung von Dienstleistungen und ein verändertes Einkaufsverhalten maßgeblich beigetragen haben.

Über das Public Dashboard haben auch Bürger:innen die Möglichkeit sich über die zu erwartende Schadstoffbelastung leicht verständlich mittels Hinweisen in Form einer Tacho-Anzeige zu informieren. Die Mobilitätskarte visualisiert zudem die Verkehrszählung sowohl in Echtzeit als auch historisch. Für technisch Interessierte und externe Fachanwender:innen stehen Daten auf der Open Data Plattform zur Verfügung. Für Verkehrsplaner:innen der Stadt hingegen wurde ein Anwender:innen Portal entwickelt mit diversen Visualisierungs- und Analyticsfunktionen.

3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Schutzrechtanmeldung/Lizenz:

Es wurden keine Schutzrechte angemeldet. Zudem ist auch keine Lizenz daraus entstanden.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende:

MVV hat ein eigenes Entwickler:innen-team und eine Datenplattform innerhalb des Bereichs Smart Cities. Somit könnte mit eigenem Personal die Verkehrstransparenzplattform auch auf andere Kommunen kurzfristig transferiert werden. Lediglich die Wärmebildkameras mit der Klassifizierung sind extern beschafft worden. Wie der Erfahrungsaustausch mit anderen Städten zeigte, ist das Projekt MaVI weit vorangeschritten. Vor allem hinsichtlich der Optimierung der Fahrzeugklassifizierung konnte ein Vorsprung geschaffen werden. Ferner stellt Mobilität eines der Kernthemen einer Smart City dar. Folglich wird eine Verkehrsklassifizierung und Luftschadstoffprognose sowohl von den meisten Smart Cities als auch von Städten mit hoher Luftschadstoffbelastung benötigt.

Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten:

Der wissenschaftliche Nutzen der gewonnenen Daten und Modelle ist sehr hoch für Verkehrsplaner:innen. Dies ist dadurch zu begründen, dass standardmäßig die Induktionsschleife zur Fahrzeugzählung eingesetzt wird. Diese kann lediglich Geschwindigkeiten und Abstände messen, jedoch keine Verkehrsteilnehmer:innen klassifizieren. Das darauf aufbauende Prognosemodell kann mittelfristig mit mehr Daten, weiteren Standorten und zusätzlichen Parametern optimiert werden. Mit dem Public Dashboard, dem Fachanwender:innen Portal sowie dem Open Data Portal stehen auch nach Projektende den unterschiedlichen Interessent:innen-gruppen die Daten und Prognosemodelle zur Verfügung. Somit wurde eine Grundlage für Unternehmen und Städte geschaffen, um über das Projekt hinaus Innovationen in diesem Bereich voranzutreiben.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit:

Die im Projekt erhobenen Daten werden seit Projektende der Stadt Mannheim zur Verfügung gestellt und die Plattform weiterbetrieben. Im Zuge des Förderprogramms Modellprojekte Smart Cities erweitert die Stadt die Verkehrszählung auf die gesamte Stadt aus. Die Fortführung der Datenerfassung, Modellierung und Prognose, sowie deren weitere Optimierung ermöglichen weit präzisere Forschung zum Einfluss saisonaler Effekte, des Klimawandels, soziologischer Phänomene auf die Verkehrssituation der dadurch resultierenden Luftschadstoffe. Zudem könnte kurzfristig der öffentliche Personennahverkehr stärker eingebunden werden und so die Verkehrszählung vom Individualverkehr auf alle Verkehrsmittel ausgedehnt werden. Ferner erschien Mitte 2022 eine neue Wärmebildkamera Generation mit KI basierter Klassifizierung und Erkennung mit einer noch höheren Genauigkeit. Das Vorantreiben von Maßnahmen zur Dekarbonisierung und Digitalisierung ist auch zukünftig mit der Gründung des Joint Ventures sMArt City Mannheim GmbH im Jahr 2021 bestehend aus der städtischen Holdinggesellschaft Mannheimer Kommunalbeteiligungen GmbH und MVV Energie AG sichergestellt.

3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Der erste Pilot für die Zählung von Fahrzeugen erfolgte mit optischen Sensoren. Dabei stellte sich heraus, dass starke Sonneneinstrahlung, Schlagschatten und Nebel die Erkennungsrate verringerten. Daraufhin wurden einige Anpassungen wie Aktivierung der WDR (wide dynamic range) vorgenommen, jedoch konnten diese die Probleme nicht zufriedenstellend lösen. Aus diesem Grund fiel die Entscheidung die Fahrzeugerkennung mit Wärmebildkameras fortzusetzen, da diese witterungsunabhängig die Fahrzeuge erkennen. Darüber hinaus wurde untersucht, ob es Möglichkeiten gibt zwischen Elektro- und Verbrennungsmotoren zu unterscheiden. Zum einen auf Basis einer Infrarot-Wärmesignatur und zum anderen mittels akustischer Erkennung. Beide Lösungen eigneten sich nicht zur zuverlässigen Erkennung.

3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer:innen

Nach Projektende stehen weiterhin Projektinformationen und -daten zur Verfügung. Die relevanten Projektinformationen, Ansprechpartner:innen für Rückfragen, sowie der Abschlussbericht können der Projekthomepage entnommen werden⁸. Zugang zu den Daten auf dem Public Dashboard sind ebenfalls auf der Projekthomepage zu finden. Darüber hinaus wird nach Projektende auch das Public Dashboard⁹ mit den Verkehrsprognosen und der Mobilitätskarte weiterbetrieben.

⁸ <https://www.mvv.de/smart-cities/mavi>

⁹ <https://dashboard.mvvsmartcities.com/#/no2-prognose>



4. Kurzfassung

1. ISBN oder ISSN Veröffentlichung als PDF-Download	2. Berichtsart Schlussbericht
3. Titel MaVI - Mannheimer Verkehrstransparenzplattform für den Individualverkehr	
4. Autor(en) Dr. Robert Thomann Cem Tekinbas Marius Berlinghof Eric Bauer Yasmin Lachmann	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.07.2022
	6. Veröffentlichungsdatum 28.02.2023
	7. Form der Publikation Online
8. Durchführende Institution MVV Energie AG Luisenring 49 68159 Mannheim	9. Ber. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16DKV42062
	11. Seitenzahl 34
12. Fördernde Institution Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur Invalidenstraße 44 D-10115 Berlin	13. Literaturangabe 5
	14. Tabellen 3
	15. Abbildungen 13
16. Zusätzliche Angaben keine	
17. Vorgelegt bei Veröffentlichung als PDF-Download https://www.mvv.de/smart-cities/mavi	
18. Kurzfassung Knapp 170.000 Menschen pendelten 2019 pro Tag nach und aus Mannheim. Entsprechend hoch war die Schadstoffbelastung mit 42 µg/m ³ in der Luft. Um Maßnahmen zur Vermeidung einer Grenzwertüberschreitung von über 40 µg/m ³ rechtzeitig einzuleiten, verfolgt das Projekte MaVI (Mannheimer Verkehrstransparenzplattform für den Individualverkehr) die Entwicklung eines Modells, dass die zu erwartende Luftschadstoff-Belastung in den nächsten 12 bis 24 Stunden vorhersagt. Im ersten Schritt wurde eine Verkehrstransparenzplattform für die Verarbeitung, Analyse und Visualisierung von Verkehrs- und Umweltdaten aufgebaut. Darauffolgend wurde an Knotenpunkten im Innenstadtbereich von Mannheim mittels Wärmebildkameras der Individualverkehr erfasst und nach Schwerlast, leichte Nutzfahrzeuge, PKW und Motorräder klassifiziert. Anschließend wurden Korrelationen untersucht, um darauf die Modellbildung aufzubauen. Sowohl die Echtzeitinformationen, historischen Werte als auch die Vorhersagen sind in einem frei zugänglichen Dashboard bereitgestellt. Auf Basis der Vorhersagen können Maßnahmen zur Reduktion der Schadstoffbelastung abgeleitet werden.	
19. Schlagwörter Smart City, Datenplattform, Dashboard, Wärmebildkamera, Umweltdaten, Verkehrszählung, Verkehrsklassifizierung, Luftschadstoffe, Schadstoff Prognose, Vorhersagemodell, Warnsysteme, Anreizsysteme, Verkehrsvisualisierung	
20. Verlag	21. Preis



Document Sontrol Sheet

1. ISBN or ISSN publication as PDF download	2. type of document final report
3. titel MaVI - Mannheim traffic transparency platform for individual traffic	
4. author(s) Dr. Robert Thomann Cem Tekinbas Marius Berlinghof Eric Bauer Yasmin Lachmann	5. end of project July 31, 2022
	6. publication date February 28, 2023
	7. form of publication online
8. performing organization MVV Energie AG Luisenring 49 68159 Mannheim	9. originator's report no.
	10. reference no. 16DKV42062
	11. no. Of pages 34
12. sponsoring agency Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur Invalidenstraße 44 D-10115 Berlin	13. no. Of references 5
	14. no. Of tables 3
	15. no. Of figures 13
16. supplementary notes none	
17. presented at publication as PDF download: https://www.mvv.de/smart-cities/mavi	
18. abstract Almost 170,000 people commuted to and from Mannheim per day in 2019. The pollution level of 42 µg/m ³ in the air was correspondingly high. In order to initiate measures to avoid exceeding the limit value of more than 40 µg/m ³ in time, the project MaVI (Mannheim Traffic Transparency Platform for Individual Traffic) pursues the development of a model that predicts the expected air pollutant load in the next 12 to 24 hours. In a first step, a traffic transparency platform for the processing, analysis and visualization of traffic and environmental data was established. Subsequently, individual traffic was recorded at intersections in the inner-city area of Mannheim using thermal imaging cameras and classifying vehicles as trucks, light commercial vehicles, passenger cars or motorcycles. Subsequently, correlations were investigated in order to build up the model. Both the real-time information, historical values and predictions are provided in a freely accessible dashboard. Based on the predictions, measures to reduce pollution can be derived.	
19. keywords smart city, data platform, dashboard, thermal imaging camera, environmental data, traffic counting, traffic classification, air pollution, pollutant prediction, prediction model, warning system, incentive system, traffic visualization	
20. publisher	21. price



5. Anhang

Anhang 1: Stickstoffoxid Modelle

NO₂-Validierung

	NO ₂ 1	NO ₂ 2	NO ₂ 3	NO ₂ 6	NO ₂ 12	NO ₂ 24
MSE	37,675	57,229	62,167	67,813	75,644	77,639
RMSE	6,138	7,565	7,885	8,235	8,697	8,811
MAE	4,414	5,495	5,829	6,164	6,504	6,659
R2	0,824	0,732	0,709	0,683	0,646	0,637

Tabelle 1: Daten der NO₂-Modelle anhand des Testdatensatzes:

Die Testwerte der NO₂-Modelle lassen für einen kurzen Prognosehorizont auf eine gute Nachbildung des NO₂-Verlaufs mit einem MAE zwischen 4 und 6 µg/m³ schließen. Der RMSE für eine Vorhersage bis 3 h liegt zwischen 6 und 8 µg/m³.

	NO ₂ _pred1	NO ₂ _pred2	NO ₂ _pred3	NO ₂ _pred6	NO ₂ _pred12	NO ₂ _pred24
MSE	152,983	188,601	287,472	252,014	322,848	358,555
RMSE	12,369	13,733	16,955	15,875	17,968	18,936
MAE	8,473	9,134	11,678	11,244	12,860	14,026
R2	0,550	0,456	0,162	0,140	0,025	0,013

Tabelle 2: Daten der NO₂-Modelle anhand der Validierungsdaten:

Bei der Validierung zeigte sich, dass die mit den Testdaten prognostizierten Modellwerte mit der Realität nicht übereinstimmen. Die Fehlerwerte sind ungefähr doppelt so hoch wie die Testwerte. Besonders das Bestimmtheitsmaß fällt bei einem weiteren Wertevergleich als stark abweichend auf. Mit einem Vergleich über einen größeren Zeitraum ist jedoch vor allem beim Bestimmtheitsmaß noch von einer Verbesserung der Werte auszugehen.

Fazit: Es ist davon auszugehen, dass die Copernicus-Vorhersagen für die hohen Abweichungen verantwortlich sind, da diese in den Modellen den größten Einfluss haben. Da damit im Vorfeld bereits gerechnet wurde und andernfalls bei weitem nicht die Qualität zumindest an den Testdaten zu erreichen schien, ist hier hinsichtlich des MAE und RMSE von einem zufriedenstellenden Ergebnis zu sprechen.

Abkürzung	Erläuterung
MSE	mean squared error = Mittlere quadratische Abweichung
RMSE	root-mean-square error = Mittleres Abweichungsquadrat
MAE	mean absolute error = Mittlerer absoluter Fehler
R2	Bestimmtheitsmaß



NO-Validierung

	NO 1	NO 2	NO 3	NO 6	NO 12	NO 24
MSE	149,881	216,992	241,507	257,472	268,185	277,339
RMSE	12,243	14,731	15,54	16,046	16,376	16,653
MAE	6,945	8,405	8,971	9,479	9,649	9,814
R2	0,809	0,724	0,693	0,673	0,659	0,647

Tabelle 3: Daten der NO-Modelle anhand des Testdatensatzes

Die NO-Prognose-Modelle weisen trotz der meist geringeren Messwerte im Vergleich zu NO₂ höhere MAE- und RMSE-Werte auf. Besonders der RMSE ist bei den NO-Modellen beinahe doppelt so hoch wie der MAE, was einer hohen Zahl an Ausreißern im Trainings- beziehungsweise Testdatensatz geschuldet sein kann.

	NO_pred1	NO_pred2	NO_pred3	NO_pred6	NO_pred12	NO_pred24
MSE	97,083	56,883	78,485	46,383	290,871	55,478
RMSE	9,853	7,542	8,859	6,810	17,055	7,448
MAE	6,439	5,160	6,166	5,239	11,383	5,482
R2	0,433	0,521	0,423	0,213	0,099	0,229

Tabelle 4: Daten der NO-Modelle anhand der Validierungsdaten

Bis auf die 12-Stundenprognose sind die Validierungsergebnisse besser als die zu erwartenden Ergebnisse des Testdatensatzes. Besonders die niedrigen Ergebnisse des RMSE fallen hier auf (siehe Tabelle 6). Dies wird sich mit einem längeren Untersuchungszeitraum aus oben genannten Gründen noch ändern. Die Werte des Bestimmtheitsmaßes sind auch hier sehr niedrig, jedoch natürlich auch der Datensatzgröße geschuldet.

Fazit: Die geringere Abhängigkeit der NO-Modelle von den Copernicus-Daten beeinflusst hier das Ergebnis positiv.

Abkürzung	Erläuterung
MSE	mean squared error = Mittlere quadratische Abweichung
RMSE	root-mean-square error = Mittleres Abweichungsquadrat
MAE	mean absolute error = Mittlerer absoluter Fehler
R2	Bestimmtheitsmaß

Anhang 2: Auszug aus dem Open Data Portal

The screenshot shows the profile for 'Traffic Sensor 007' on the MaVI platform. The left sidebar includes the organization name 'sMArt Mannheim', a 'Folgen' button, and social media links for Twitter and Facebook. The main content area displays the sensor's location (Kurt-Schumacher-Brücke Richtung Ludwigshafen), available lanes (L, R), and vehicle classes (Bikes, Motorrad, PKW, Kleintransporter, Transporter, LKW). A list of CSV data files from January 13-17, 2023, is shown with 'Entdecke' buttons. Below this, there are filters for 'MIV', 'NMIV', and 'Verkehr'. The 'Zusätzliche Informationen' table shows the sensor's status as 'active'.

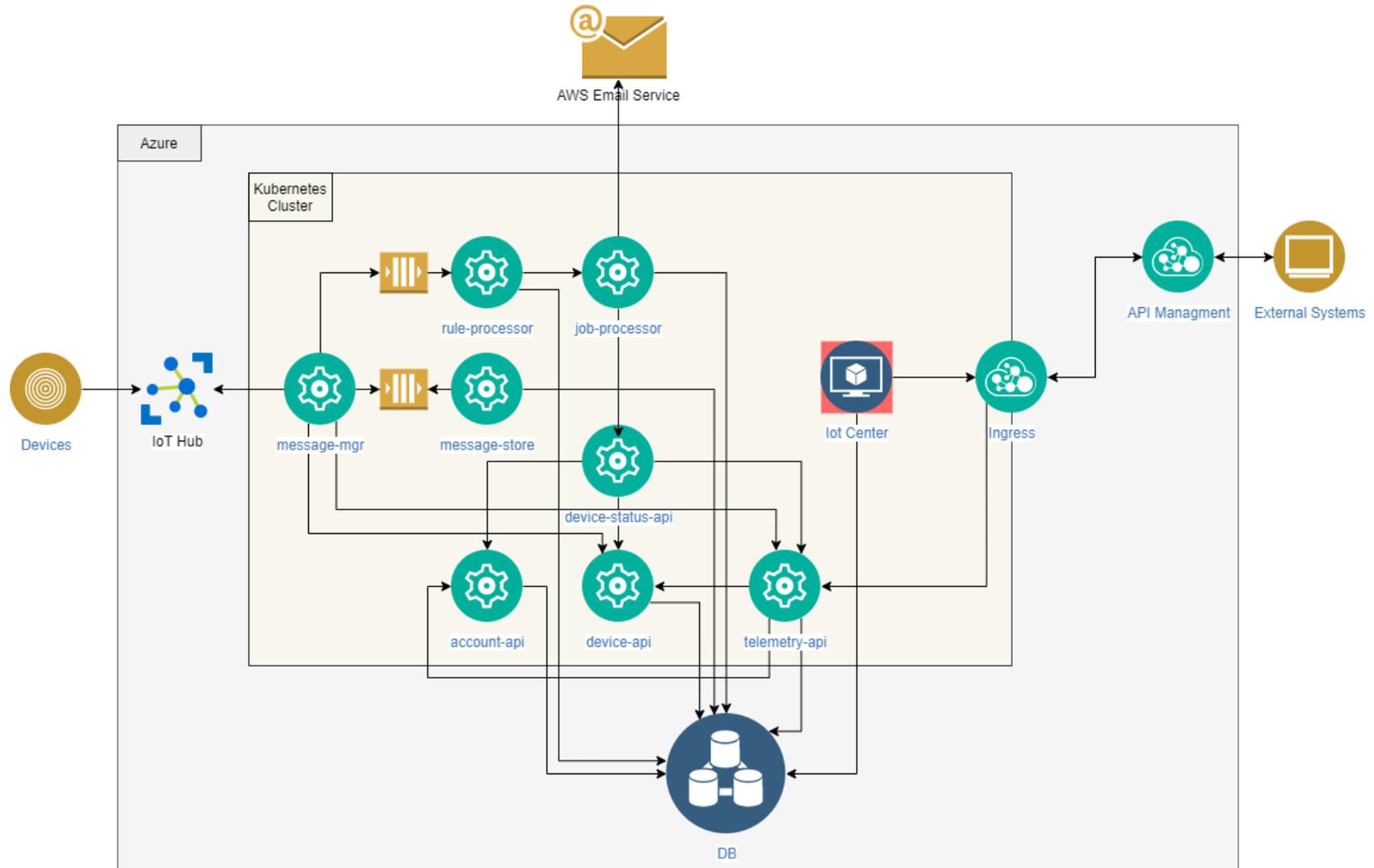
Zugang zum Open Data Portal über die Projekthomepage:

<https://www.mvv.de/smart-cities/mavi>

	A	B
1	timestamps,LC1,LC2,LC3,LC4,LC5,RC1,RC2,RC3,RC4,RC5,SC1,SC2,SC3,SC4,SC5	
2	2023-01-12T23:00:00Z,0,18,0,5,0,0,41,0,11,0,0,0,0,0	
3	2023-01-13T00:00:00Z,0,8,0,1,0,0,33,0,9,0,0,0,0,0	
4	2023-01-13T01:00:00Z,0,3,0,0,0,0,24,0,6,0,0,0,0,0	
5	2023-01-13T02:00:00Z,0,2,0,1,0,0,20,0,5,0,0,0,0,0	

Screenshot CSV Datei: Stündlicher Datensatz mit den unterschiedlichen Klassifizierungen Klasse 1 bis 5 (C1-C5) auf der linken (L) und rechten (R) Fahrspur.

Anhang 3: Architekturschaubild IoT-Center - Frontend und Backend



Anhang 4: Auszug aus dem Anwender:innen Dashboard (für z.B. Verkehrsplaner:innen)

IoT-Center



Account
MAVI

Dashboard

Wetterverlauf

Analyse Basic

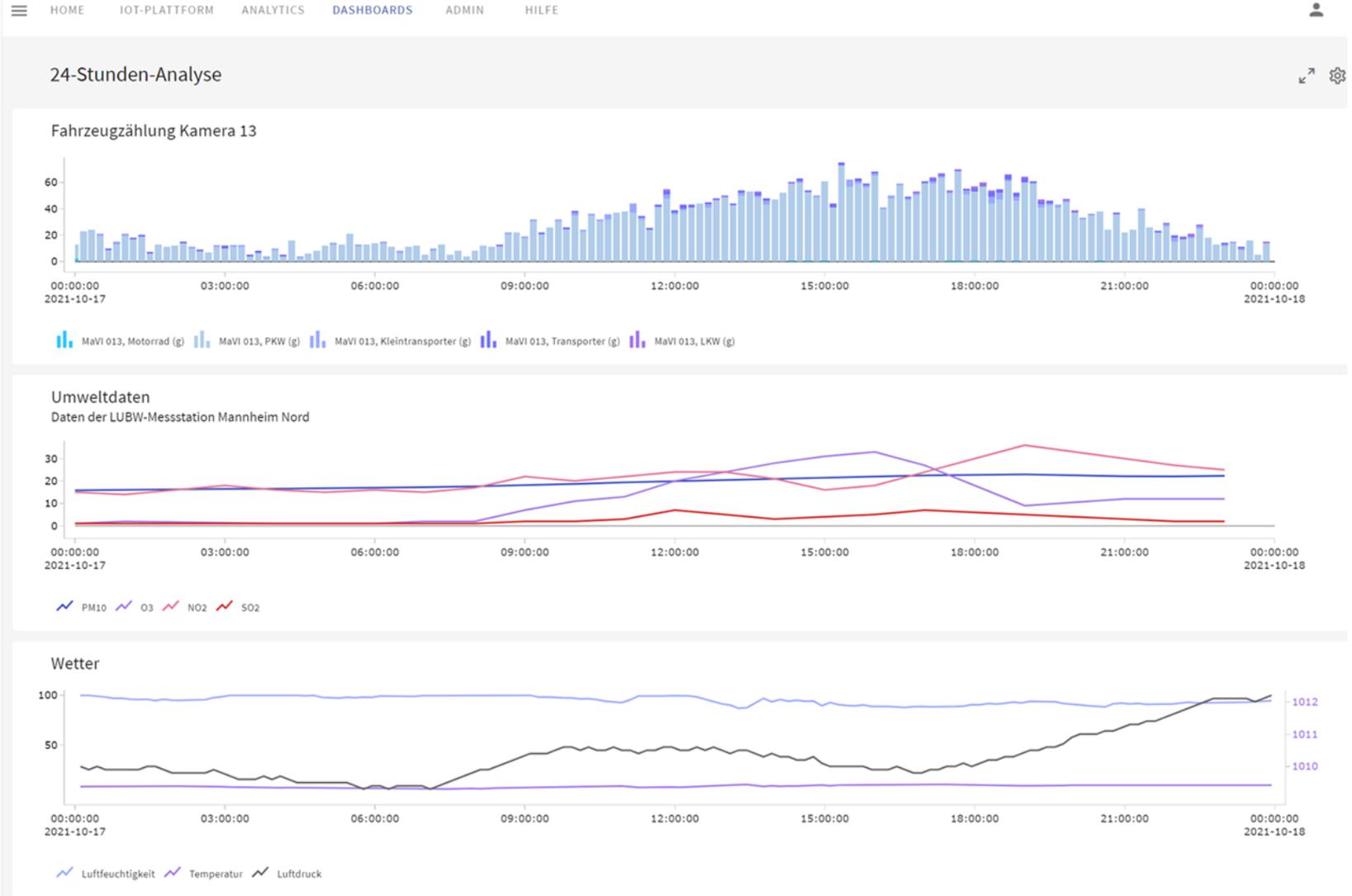
Übersicht alle Kameras 7 Tage

Verkehrszählung Mannheim

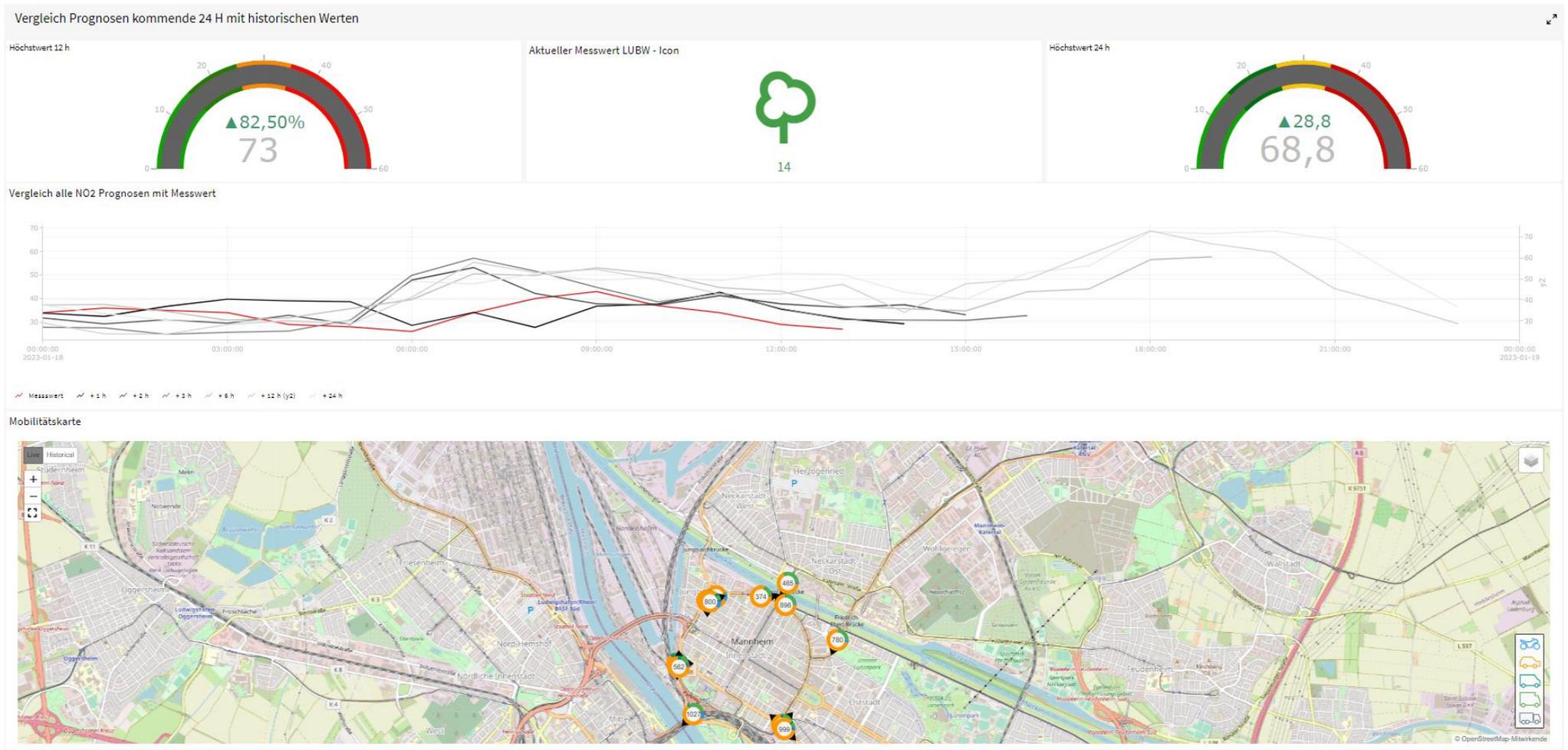
Kamera 10

Fahrzeugzählung Mannheim mit
Bezug zu Wetterdaten

24-Stunden-Analyse



Anhang 5: Auszug aus dem Public Dashboard



Link zum Public Dashboard: <https://dashboard.mvsmartcities.com/#/no2-prognose>