



AirQuality

Generierung hyperlokaler Luftqualitätskarten in Echtzeit durch mobile Messungen

Abschlussbericht



GEOTAB®

Verbundkoordinator	FIR e.V. an der RWTH Aachen	FKZ: 19F1062A
Projektpartner	Geotab GmbH	FKZ: 19F1062B

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1. Kurze Darstellung	4
1.1 Aufgabenstellung	4
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	5
1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden	9
1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	11
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
2. Eingehende Darstellung	13
2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	13
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	33
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	33
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	34
2.5 Der während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	36
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	37
Literaturverzeichnis	38
Anhang	40
A1: Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	40
A2: Testplan und Ergebnisse des AirQuality-Projekts	43
Ziel des Projektes „AirQuality“	43
Einleitung	43
Frage 1: Welcher Anteil des Aachener Stadtgebietes wird bereits mit 15 Bussen abgedeckt?	45

Frage 2: Wie viele Busse werden (noch) benötigt, um das Stadtgebiet ausreichend abzudecken?	58
Frage 3: Lässt sich zuverlässig kalkulieren, wie viele Fahrzeuge in anderen Städten für eine ausreichend flächendeckende Datensammlung benötigt werden?	61
Frage 4: Wie können weitere Fahrzeugtypen mit Sensoren ausgestattet werden und wie ist der Einfluss der Einbauposition auf die Messwerte?	64
Frage 5: Wie wirkt sich die Fahrzeuggeschwindigkeit auf die Messwerte aus?	67
Frage 6: Wie groß ist die Abweichung der Messwerte zwischen mobilen und stationären Sensoren?	69
Frage 7: Wie wirken sich Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Luftqualität bzw. die Messwerte aus?	72
Frage 8: Welche Use Cases im Bereich Smart City (z.B. Stadtplanung, Verkehrssteuerung etc.) lassen sich mit mobiler Luftqualitätserfassung angehen?	73

1. Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Um Transparenz über die Luftqualität im gesamten Stadtgebiet zu schaffen, fehlt ein engmaschiges Netz an Luftqualitätssensoren, welches lokale Problemzonen in Abhängigkeit der Tageszeit erkennbar macht. Im Rahmen des AirQuality-Projektes führten der FIR e.V. an der RWTH Aachen und der kanadische Telematikanbieter Geotab GmbH einen Proof of Concept zur Entwicklung einer Methode durch, welche die Erhebung von Luftqualitätsdaten in bisher nicht vorhandener Granularität ermöglicht: Fahrzeugflotten, die innerhalb eines Stadtgebiets unterwegs sind – wie beispielsweise Fahrzeuge des Öffentlichen Personen Nahverkehrs (ÖPNV) – wurden mit Sensorik zur Erfassung der Luftqualität ausgestattet. Die so gesammelten Daten werden analysiert und in einer über die Stadtkarte gelegten „Heatmap“ visualisiert. Mit dieser Luftqualitätskarte kann die Luftqualität straßen- und uhrzeitgenau angezeigt werden. Durch die Ergebnisse des AirQuality-Projektes ist es möglich, Orte mit erhöhter Feinstaubbelastung zu identifizieren und Maßnahmen zur Reduktion von Emissionen objektiv zu bewerten. Darüber hinaus bietet die feingranulare Datenerfassung eine Grundlage für verschiedene innovative Lösungen. Hierzu zählen beispielsweise auf aktuellen Luftqualitätswerten basierende intelligente Lichtsignalanlagen oder optimierte Routenführungen für Bürger.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Luftqualität in Städten ist ein relevantes und viel diskutiertes Thema. Seitdem seit 2011 die Deutsche Umwelthilfe gegen 40 deutsche Städte wegen Nichteinhaltung von Grenzwerten geklagt hat, beschäftigen sich Städte zunehmend mit Möglichkeiten der Luftreinhaltung (DEUTSCHE UMWELTHILFE 2020). Durch die im September 2021 veröffentlichte neue globale Luftgüteleitlinie der World Health Organization (WHO) ist zu erwarten, dass Luftqualität in den kommenden Jahren weiter an Relevanz gewinnen wird (WHO 2021). Die neuen Grenzwerte der WHO für Schadstoffe liegen weit unter den Richtwerten der EU, sind jedoch nur eine Empfehlung. Dennoch will die EU bis zum Herbst 2022 über eine Anpassung der rechtlich bindenden Grenzwerte entscheiden (BAARS 2021; WELTGESUNDHEITSORGANISATION: REGIONALBÜRO FÜR EUROPA 2021).

Vor allem innovative Ansätze, die durch Digitalisierung und neue Technologien ermöglicht werden, gewinnen bei der Luftreinhaltung an Bedeutung. Beispielsweise erprobt die Stadt Düsseldorf seit März 2021 eine umweltsensitive Lichtsignalsteuerung (PAULAT 2021), nachdem zuvor über 2 Jahre Umweltpuren eingerichtet wurden (DÜSSELDORF: NÄHE TRIFFT

FREIHEIT o.D.), mit dem Ziel die Schadstoffbelastung in der Düsseldorfer Innenstadt zu senken. Die Stadt Darmstadt hingegen arbeitet an dem Aufbau eines weitreichenden Sensornetzwerkes, um die Verteilung von Luftschadstoffen in der Stadt besser nachvollziehen zu können. Aufgrund der daraus gewonnen Erkenntnisse sollen Maßnahmen ergriffen und die gewonnenen Daten für intelligente Lösungen zur Luftreinhaltung genutzt werden. Das AirQuality-Projekt knüpft an diese aktuellen Themen an, indem es nicht nur ein innovatives Verfahren zur Erfassung von Luftqualitätsdaten erprobt, sondern auch Echtzeitdaten liefert, die für eine Vielzahl von Anwendungsfällen genutzt werden können.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde in Arbeitspaketen geplant und durchgeführt. Die ursprüngliche Projektlaufzeit sah Oktober 2020 bis März 2021 vor. Die andauernde Corona-Pandemie beeinflusste das Vorhaben erheblich, sodass die Projektlaufzeit kostenneutral um 5 Monate bis zum 31.08.2021 verlängert wurde. Abbildung 1 zeigt den final durchgeführten Projektplan nach Arbeitspaketen.

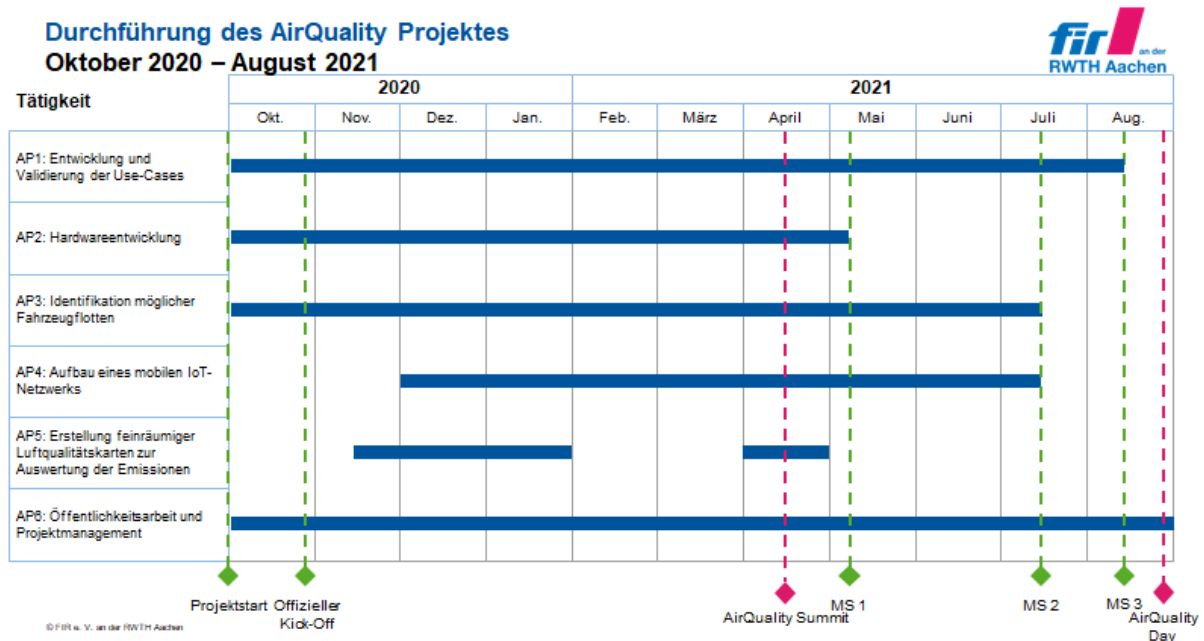


Abbildung 1: Final durchgeführter Projektplan

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Bereits 2018 beschäftigten sich Geotab und der Environmental Defense Fund (EDF) mit der Fragestellung, inwiefern Fahrzeuge des ÖPNV für die Erfassung von Luftqualitätsdaten

genutzt werden können. Schwerpunkt der Untersuchung war zu ermitteln, wie viele städtische Fahrzeuge benötigt werden, um einen großflächigen Teil einer Stadt abzudecken. Aus der in Houston durchgeführten Vorstudie geht hervor, dass in einer Stadt wie Houston circa 10-20 ausgewählte Fahrzeuge des ÖPNV ausreichen, um circa 70% der Fläche abzudecken (NOWLAN 2018). Dies führt zu der Fragestellung, inwiefern diese Ergebnisse auf weitere Städte übertragbar sind. Zur Beantwortung dieser Frage konnten drei Städte unterschiedlicher Strukturen (Aachen, Gelsenkirchen, Halle an der Saale) als Städtepartner für das Projekt gewonnen werden.

Davon ausgehend, dass je nach Stadt 10-20 mit Sensorik ausgestattete Fahrzeuge benötigt werden, sollen niedrigpreisige Sensoren verwendet werden. Hierfür werden auf dem Markt vorhandene Sensoren genutzt, sodass auf diesem technischen Stand aufgebaut werden kann. Für den erfolgreichen Aufbau des IoT-Netztes wird außerdem das Geotab GO 7 Device genutzt, mittels dessen die gesammelten Daten in die Cloud gesendet und mit GPS-Daten versehen werden.

Darüber hinaus knüpft AirQuality thematisch an eine Reihe von bereits durchgeführten und noch laufenden Initiativen und Projekten an, welche in den folgenden Tabellen dargestellt sind: Tabelle 1 führt mFUND geförderte Projekte auf, welche sich mit der Erfassung und Verarbeitung von Umwelt- und Luftqualitätsdaten befassen. Tabelle 2 gibt eine Übersicht von nationalen und internationalen Initiativen und Projekten.

Tabelle 1: Relevante mFUND geförderte Projekte

Projekt	Projektziel	Abgrenzung zu AirQuality
Smart Air Quality Network – SmartAQnet 04/2017 – 09/2020	Entwicklung eines Gesamtsystems zur Erfassung, Visualisierung und Vorhersage der räumlichen Verteilung von Feinstaubwerten in städtischen Atmosphären, die relevant für den aktuellen Aufenthalt der Bürger sind. Das Projekt strebt ein fein aufgelöstes Messnetzwerk für Luftqualität an.	Der Fokus liegt auf einer Datenplattform, welche die Integration verschiedener Datensätze erlaubt und Metriken bereitstellt. SmartAQnet konzentriert sich auf Feinstaubwerte. Die entwickelten Sensoren sind stationär, beziehungsweise müssen aktiv von Personal gesteuert werden.
Sentinel-basierte Atmosphärenprodukte zur Bewertung des Einflusses von Verkehrsemissionen auf die Luftqualität in Deutschland – S-VELD 08/2018 – 07/2021	Quantifizierung der verkehrsbedingten Schadstoffemissionen und deren Anteil an der Umweltbelastung in Deutschland auf Grundlage der Sentinel-Satellitenmessungen von NO2 und Feinstaub, sowie Verkehrsdaten	Vermessung der NO2- und Feinstaubkonzentrationen mittels Fernerkundungsdaten. Daten liegen nicht in der benötigten Granularität vor, um Städten Handlungsempfehlungen

	des BMVI.	auszusprechen.
Digitale und hochauflösende Erhebung von Umweltdaten – DEUS 08/2018 – 04/2019	Kleinteilige Messung von Luftschadstoffen korreliert mit der ortsgebundenen und fahrzeuggenauen Verkehrszählung mittels laserbasierter Messsysteme. Vorbeifahrende Fahrzeuge werden mittels Ultraschallsensoren hinsichtlich der Größe und Gewicht nach Fahrzeugtypen klassifiziert und mit Schadstoffwerten korreliert.	Aufbau feingranularer, aber stationärer Messsysteme mittels Laser. Im Rahmen von DEUS werden keine mobilen Sensoreinheiten verwendet, jedoch werden einzelne Autos hinsichtlich des jeweiligen Schadstoffausstoßes stationär vom Fahrbahnrand vermessen.
Satellitenbasiertes System zur Anzeige, Prognose und Simulation von Luftschadstoffen für eine nachhaltige Stadt- und Regionalentwicklung – SAUBER 10/2018 – 09/2021	Erschließung der Daten des Copernicus-Programms für eine nachhaltige Stadt- bzw. Regionalentwicklung. Darstellung aktueller, sowie prognostizierter Luftqualität zur proaktiven Umplanung und Vermeidung.	Vermessung der Luftqualität mittels Satellitendaten. Daten liegen nicht in der benötigten Granularität vor, um Städten Handlungsempfehlungen auszusprechen
KI gestützte Schadstoffprognose zur intelligenten Verkehrssteuerung – KISP 11/2018 – 05/2019	Untersuchung der Machbarkeit einer lokalen Schadstoffprognose für Städte und Gemeinden auf Basis mehrjähriger Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) mithilfe von künstlicher Intelligenz.	Keine Erfassung und Prognose auf Basis von mobil erfassten Echtzeitdaten.
Automatisierte luftgestützte Messung der Schadstoffbelastung in der erdnahen Atmosphäre in urbanen Räumen - MesSBAR 09/2019 – 08/2022	Entwicklung eines mobilen, modularen Schadstoff-Messsystems zur Messung der Verteilung von Feinstaub, Ruß, NOx und O3 bis in einer Höhe von 1 KM; Flexibel einsetzbare Drohnen mit miniaturisierter Sensorik für die Optimierung von Schadstoffvorhersagen	Entwicklung eines mobilen, modularen Schadstoff-Messsystems zur Messung der Verteilung von Feinstaub, Ruß, NOx und O3 bis in einer Höhe von 1 KM; Flexibel einsetzbare Drohnen mit miniaturisierter Sensorik für die Optimierung von Schadstoffvorhersagen
mobile Air Quality Network - mAiQNet 03/2020 - 02/2021	Entwicklung eines Messnetzes von der Verteilung von Stickoxiden, Nutzung u.a. von Kommunen, um gezielt Maßnahmen zur Schadstoffsenkung einzuleiten, Erstellung einer Karte zur aktuellen Schadstoffbelastung	Messung von Stickoxiden, Kombination aus mobilen Sensoren in PKWs und festen Messstationen
Flotten-Wetter-Karte - FloWKar 09/2017 - 08/2021	Bessere Wetterkarten für autonomes Fahren, Nutzung der Umweltsensorik von PKWs zur Erstellung einer hochauflösenden	Nutzung von vorhandener Sensorik, Messung von Wetterbedingungen und nicht Feinstaub

	Wetterkarte	
Künstliche Intelligenz im Transport zur Emissionsreduktion - KITE 06/2020 - 05/2023	Vermeidung von Leer- und teilbeladenen Fahrten von Speditionsunternehmen, Verbesserung von Transportnetzwerken zur CO2 Reduzierung	Keine Überwachung der Umwelt, Fokus auf Reduzierung von Emissionen und Feinstaub

Tabelle 2: Relevante nationale und internationale Initiativen und Projekte

Unternehmen/Projekt	Projektziel	Abgrenzung/Ergänzung
Breathe London (EDF Europe)	Das Projekt ist ein Projekt des EDF Europe, das mithilfe von zwei auf Google Street View-Autos montierten mobilen Sensoren sowie einhundert stationären Sensoren 2019 die Luftqualität in London überwacht und die Bewohner über die Feinstaubbelastung aufklärt.	Es wird eine geringe Anzahl an mobilen Sensoren in Kombination mit stationären Sensoren eingesetzt. AirQuality setzt hingegen auf eine möglichst hohe Anzahl an mobilen Sensoren, welche durch Open Source Daten ergänzt werden. AirQuality strebt außerdem eine möglichst kontinuierliche Überwachung der Qualität an, während Breathe London einmalig die Straßenabschnitte scannt.
Hawa Dawa	Aufzeigen der Luftbelastung innerhalb von Städten mittels einer Kombination von Daten aus kostengünstigen stationären Messstationen und Satellitendaten	Hawa Dawa entwickelt kostengünstige Messstationen zur Überwachung der Luftqualität. Die entwickelten Sensorstationen sind lediglich für den stationären Gebrauch bestimmt. Mittels Interpolation und Satellitendaten wird versucht möglichst genaue Luftqualitätsdaten von Orten ohne die stationären Sensoren zu berechnen.
Smart Air Quality Monitoring (Telekom)	Smart Air Quality Monitoring ermöglicht mittels der festen Installation von Sensorboxen mit einem Anschluss an die Telekom Smart City Cloud SaaS Luftqualitätsdaten für die weitere	Die Telekom nutzt festinstallierte Sensorboxen, die über eine Cloud Infrastruktur vernetzt sind, um Aussagen über die Luftqualität zu treffen. Es wird keine Sensorik auf

	Verwendung zu erheben.	mobilen Flotten eingesetzt, um Daten in Echtzeit zu erheben.
Bosch Air Quality Solutions	Entwicklung und Bau von Sensorik für die Erfassung von Luftqualitäts- und Umweltdaten, die stationär betrieben werden.	Fokus liegt auf der Entwicklung und Vertrieb der Sensorik.
Google Earth Outreach	Forschungsgruppe mit dem Fokus auf mobiler Luftqualitätsdatenerfassung. Verwendung hochpreisiger Sensorik, die hauptsächlich in Autos (Google Street View Cars) verbaut wird, die gezielt auf vorgegeben Strecken eingesetzt werden.	AirQuality setzt auf Niedrigpreissensoren und verbaut diese in Fahrzeugen, die täglich im Stadtgebiet unterwegs sind.
Siemens CyAM	Siemens CyAM nutzt die Umweltdaten, die über die offiziellen Messstationen der Länder erfasst werden und ergänzt diese mit meteorologischen Daten. Mit einer KI wird die Luftqualität interpoliert und prognostiziert. Verschiedene Maßnahmen der Luftreinhaltung (bspw. Straßensperrungen) werden simuliert und die Auswirkungen kalkuliert.	Siemens CyAM nutzt bereits vorhandene Datenquellen und reichert diese mit KI an.

1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Weltweit gibt es viele Open-Source-Projekte, die sich mit Fragen der Luftverschmutzung und ihrer Messbarkeit befassen. Open-Source-Projekte die sich mit stationären Messsystemen sowie mobilen Low-Cost-Sensorik befassen, wurden in der Anfangsphasen analysiert um Einblicke in die Möglichkeiten der Skalierung, Genauigkeit und Anpassungsfähigkeit zu gewinnen. Dazu gehörten:

- a) [Mobile Fine Dust \(PM10 & PM2.5\) and NO2 Meter](#) (TELINA 2018)
- b) [Distributed Air Quality Monitoring \(Using Taxis!\)](#) (PUDERER 2017)
- c) [Particulate: Air Quality Monitoring for Everyone](#) (CRASK 2018)
- d) [IoT@School: An IoT Implementation for Monitoring Air Quality](#) (KEMPENEERS 2016)

Die bei diesen Projekten verwendeten Sensorbausteine für Feinstaub, Temperatur, Luftdruck und -feuchtigkeit oder NO₂, sowie der Mikrokontroller (RASPI, ARDUINO) gaben einen ersten Aufschluss über das verfügbare Marktangebot Mitte 2018.

Die Visualisierung von Luftqualitätsdaten kann mit Hilfe der vielen Sensoranbieter (basierend auf Citizen-Science-Initiativen oder kommerziellen Anbietern) untersucht werden, wo die (teilweise) frei verfügbaren Daten der zertifizierten Messstationen, sowie die Daten von nicht zertifizierten Stationen ein Kartenmaterial mit hoher Auflösung erzeugen können.

- a) [Sensor.Community](#) (SENSOR.COMMUNITY o.D.) (ehemals [Luftdaten.info](#) (LUFTDATEN.INFO o.D.))
- b) [Breeze Technologies](#) (BREEZE TECHNOLOGIES o.D.)
- c) [AirMatters](#) (AIR MATTERS o.D.)
- d) [Purple Air](#) (PURPLEAIR o.D.)
- e) [World Air Quality Index project](#) (ABOUT THE WORLD AIR QUALITY INDEX PROJECT o.D.)
- f) [LANUV](#) (LANUV o.D.) und deutsches [Umweltbundesamt](#) (UMWELT BUNDESAMT o.D.)

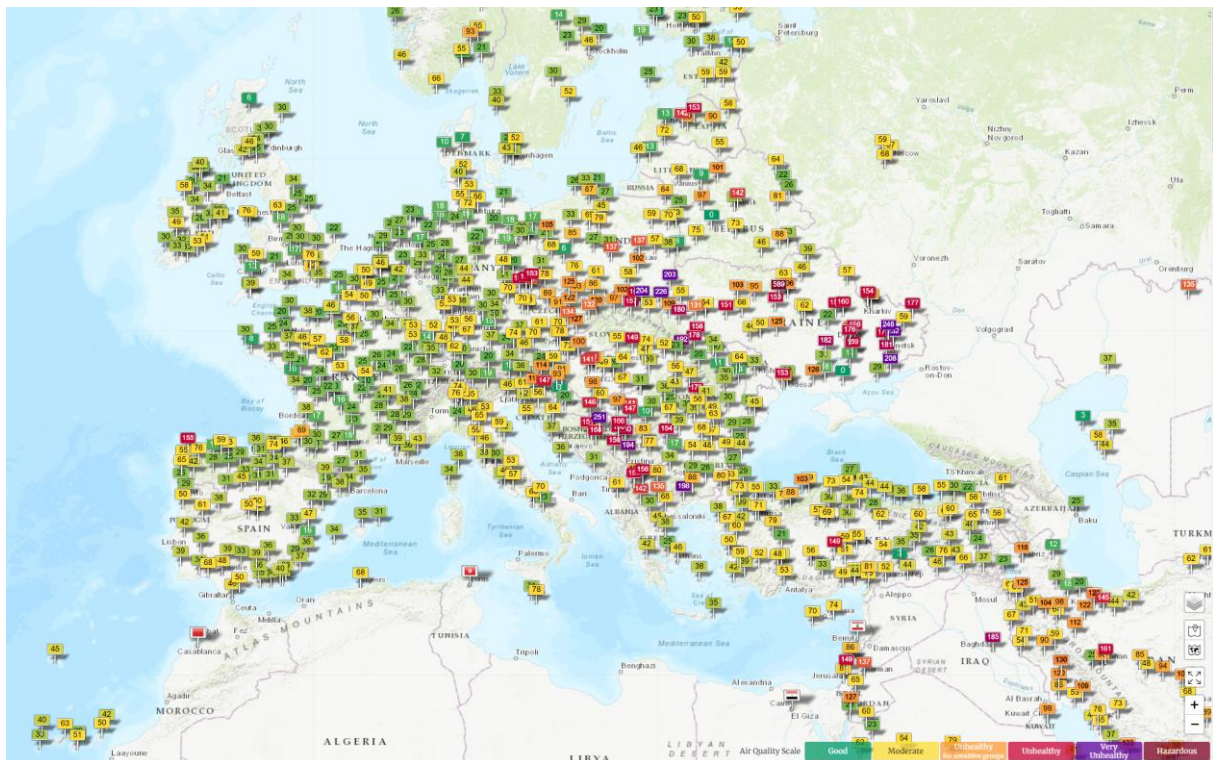


Abbildung 2: Real-time Air Quality Index am 26.10.2021 um 20:30;
aktuelle Werte online unter: <https://waqi.info/#/c/47.813/6.485/5.1z>

1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Siehe Anhang A1.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der Durchführung nahm das Interesse an dem AirQuality-Projekt zu. Infolge des Austauschs mit verschiedenen Interessensgruppen vergrößerte sich das Netzwerk stetig. Insbesondere mit anderen mFUND-geförderten Projekten sowie Forschungsvorhaben im Bereich der Luftqualitätsdatenerfassung wurde der Dialog gefördert, sodass Synergien geschaffen und voneinander gelernt werden konnte:

- **Stadt Aachen:** Die Stadt Aachen (AC) ist ein Anwendungspartner des AirQuality-Projektes. Aufgrund der räumlichen Nähe konnte ein regelmäßiger Austausch bezüglich Anwendungsfällen sowie Präsentationen und Feedbacks bisher erreichter Ziele des Vorhabens realisiert werden.
- **Stadt Halle an der Saale:** Die Stadt Halle an der Saale (HAL) ist ebenfalls ein Anwendungspartner im Projekt. Sie unterscheidet sich sowohl vom Stadtaufbau als auch vom ÖPNV-Netz von der Stadt Aachen, sodass sie ein wichtiges Element zur Überprüfung der Übertragbarkeit der AirQuality-Lösung war. Die Stadt Halle an der Saale trug zu der Identifizierung und Validierung von Anwendungsfällen bei.
- **Stadt Gelsenkirchen:** Die Stadt Gelsenkirchen (GE) unterstützte bei Feedback gewonnener Ergebnisse und bei der Identifizierung von Anwendungsfällen.
- **ASEAG:** Der ÖPNV-Anbieter der Stadt Aachen war einer der wichtigsten Partner des Projektvorhabens. Die ASEAG stellte die Busse, in welche die AirQuality-Sensoren verbaut wurden, zur Verfügung.
- **HAVAG:** Mit dem ÖPNV-Betreiber in Halle an der Saale wurden Möglichkeiten diskutiert, Sensoren in den Straßenbahnen zu verbauen.
- **LANUV:** Das LANUV genehmigte die Platzierung der Sensorprototypen auf einer offiziellen Messstation. Um die stationär erfassten Daten mit denen des LANUV abzugleichen, stellte das LANUV die Rohdaten der Station zur Verfügung.
- **Center Smart Services:** Das Center Smart Services ist spezialisiert auf die Entwicklung digitaler Geschäftsmodelle. Deswegen unterstützte das Center Smart Services bei Bedarf das AirQuality-Projektteam bei der Durchführung von Workshops und der Evaluation der Anwendungsfälle.
- **mAiQNet:** Dieses ehemals vom mFUND geförderte Projekte hatte eine ähnliche Ausrichtung wie das AirQuality-Projekt. Der Betrachtungsschwerpunkt lag jedoch auf

der Untersuchung von NO_x im Zusammenhang mit Taxen. Mit dem mAiQNet-Projekt fand ein regelmäßiger Austausch hinsichtlich eingesetzter Technik und erzielter Ergebnisse statt.

- **FAIR:** Das mFUND geförderte Projekt fokussiert sich auf die Datenbereitstellung von Klima- und Wetterdaten. Gemeinsam wurde über Möglichkeiten der Integration von Wetterdaten in die Visualisierung diskutiert
- **DEUS:** Das mFUND geförderte Projekt verfolgt ähnliche Ansätze wie AirQuality und profitiert bereits von mehrjähriger Erfahrung im Bereich mobiler Messungen. Mit dem Projektteam DEUS wurden Erfahrungen ausgetauscht, vor allem bezogen auf die mobile Messung von NO_x mit Niedrigpreissensoren.

Austausch und Diskussion mit weiteren Interessensgruppen:

- **Bosch Air Quality Solutions:** Vorstellung der Methoden zur Luftqualitätsmessung; Diskussion über Messverfahren und verwendete Sensorik;
- **Digitalstadt Darmstadt:** Austausch über Anwendungsfälle in Städten; Ansätze zur Erfassung feingranularer Luftqualitätsdaten;
- **Google Earth Outreach:** Austausch über mobile Umweltdatenerhebung; Diskussion über technische Optimierung des Sensors für den mobilen Einsatz;
- **NV-ProVi:** Überlegung der Kooperation um Busse als mobile Datensammler einsetzen zu können; Konkrete Gespräche sind jedoch erst angedacht, wenn das Projekt NV-ProVi weiter fortgeschritten ist
- **Siemens CyAM:** Vorstellung der Methoden zur Luftqualitätsmessung, Datenverarbeitung und Anwendungsfälle;
- **Stadt Mainz:** Pitch des AirQuality-Projektes bei der Smart City Fokusgruppe der Mainzer Stadtwerke am 1.12.2020 mit anschließender Diskussion
- **Verschiedene Sensorhersteller:** Diskussion über die Eignung von Niedrigpreissensoren für den mobilen Einsatz, Messgenauigkeit und technische Details;

2. Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die nachfolgende Tabelle bietet einen Überblick über die in den einzelnen Arbeitspaketen festgelegten Ziele und die tatsächlichen Ergebnisse. Es folgt eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse der Arbeitspakete 1 bis 5. Zusätzliche Informationen zu Arbeitspaket 6 sind in Kapitel 2.6 erläutert. Im Antrag aufgeführte Forschungsfragen sind im Anhang A2 zu finden.

Tabelle 3: Übersicht der geplanten und tatsächlich erzielten Ergebnisse nach Arbeitspaket

Arbeitspaket	Geplantes Ergebnis	Tatsächliches Ergebnis	Bemerkung
1) Entwicklung und Validierung der Use Cases	<ol style="list-style-type: none"> 1) Identifikation und Beschreibung von drei möglichen Use Cases mit Zielgruppen 2) Kontinuierliche Einbindung der Anwender in die technische Entwicklung 3) Bestimmung der groben Geschäftspotenziale für die entwickelten Use Cases 	<ul style="list-style-type: none"> • Identifikation von vier Use Cases für verschiedene Stakeholder • Identifikation von Interessengruppen und respektiven Geschäftsmodellen • Regelmäßiger Austausch mit Städtepartnern und Feedback über Entwicklungsstand 	<ul style="list-style-type: none"> • Workshop am 09.11.2020 mit GE • Workshop am 09.12.2020 mit HAL • Workshop am 11.05.2021 mit AC • Workshop am 23.06.2021 mit den Städten AC, HAL, GE
2) Hardwareentwicklung	<ol style="list-style-type: none"> 1) Eine fertig entwickelte und konstruierte Sensoreinheit, zum Einbau in mobile Flotten 2) Platzierung der Sensoreinheit auf den offiziellen Messstationen der Städte Aachen, Halle (Saale) und Gelsenkirchen 3) Testfahrten in Aachen mit zwei identischen Testfahrzeugen 	<ul style="list-style-type: none"> • Iteratives Prototyping und Testung zweier Versionen des Sensors im mobilen Einsatz • Platzierung des „finalen“ Sensors auf der offiziellen Messstation VACW in Aachen • Testfahrten mit drei Bussen der ASEAG • Abgleich der stationär erfassten Daten mit den offiziell erfassten Rohdaten des LANUV 	

	4) Sicherstellung der Validität der erhobenen Daten und Informationen		
3) Identifikation möglicher Fahrzeugflotten	<p>1) Analyse relevanter Merkmale von Fahrzeugflotten sowie potenzieller Flottenbetreiber</p> <p>2) Merkmalskatalog zur optimalen Identifikation potenzieller Flotten</p> <p>3) Identifikation zwei geeigneter Fahrzeugflotten je Stadt</p> <p>4) Festlegung optimaler Einbauorte der Sensoren, abhängig vom Fahrzeugtyp</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl von Bussen des ÖPNV in der Stadt Aachen • Erstellung eines Merkmalkataloges zur Auswahl geeigneter Flotten (Siehe Tabelle 4) • Erproben von Einbauorten und Festlegung des optimalen Einbauortes 	
4) Aufbau eines mobilen IoT-Netzes	<p>1) Integration der Datenpunkte in die bestehende Geotab Telematik Plattform</p> <p>2) Aufbau einer Datenarchitektur zur Verwendung der Luftqualitätsdaten</p> <p>3) Ausstattung von 10 Fahrzeugen je Stadt mit der Sensorik</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau einer Datenarchitektur und eines IoT-Netzes auf Grundlage der bestehenden Geotab Telematik Plattform • 15 Sensoren in Bussen der ASEAG in Aachen verbaut 	<ul style="list-style-type: none"> • GE priorisierte eigene Forschungsprojekte, weswegen wenig Kapazitäten für das AirQuality-Projekt frei waren • HAL war an einer Installation der Sensoren interessiert. Aufgrund von Corona und der damit verbundenen Reisebeschränkungen verzögerten sich die Gespräche mit dem Verkehrsbetrieb. Aufgrund der kurzen Projektlaufzeit und längerer Entscheidungsfindung des Verkehrsbetriebs konnten keine Sensoren verbaut werden.

<p>5) Erstellung feinträumiger Luftqualitätskarten zur Auswertung der Emissionen</p>	<p>1) Integration mind. drei anderer bereits bestehender Luftqualitätsdaten</p> <p>2) Entwicklung einer offenen Nutzerschnittstelle</p> <p>3) Entwicklung einer Visualisierung für die Nutzergruppen</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Integration offizieller Luftqualitätsdaten des LANUV ● Aufgesetzt in Testumgebung, bisher keine offene Nutzerschnittstelle ● Interaktive Visualisierung erstellt 	<ul style="list-style-type: none"> ● Validierung der Luftqualitätskarte mit den Städten AC, HAL, GE
<p>6) Öffentlichkeitsarbeit und Projektmanagement</p>	<p>1) Qualitativ hochwertiges Projektmanagement während der Förderlaufzeit</p> <p>2) Know-how-Transfer zwischen den Projektpartnern</p> <p>3) Wahrnehmung des Projektes in der Öffentlichkeit sowie transferierte Forschungsergebnisse</p> <p>4) Verfassung der Pressemitteilung</p> <p>5) Erstellung einer Webseite</p> <p>6) Verfassung von zwei Beiträgen für den Blog von Geotab</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Jede Woche Regeltermin mit den Projektpartnern ● Pressemitteilung zum Projektstart veröffentlicht am 26.11.2020 ● Grundlage für die Masterarbeit "<i>Business model development for a vehicle based ambient air quality monitoring - a case study in Aachen, Germany</i>" an der Universität Maastricht (eingereicht am 27.11.2020) ● Pitch bei der Smart City Fokusgruppe am 1.12.2020 ● Projekthomepage: https://mobile-airquality.com/ airquality.fir.de ● Projektvorstellung beim Kolloquium „Luftqualität an Straßen“ am 24.03. bis 25.03.2021 sowie Beitrag im Tagungsband ● Durchführung des <i>AirQuality Summits</i> am 15.04.2021 mit ca. 90 TeilnehmerInnen ● Durchführung des <i>AirQuality-Days</i> als Ergebnispräsentation und Fachkolloquium am 	

		<p>18.08.2021 mit ca. 55 TeilnehmerInnen</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Blogbeitrag von Geotab, 04.10.2021 ● Vortrag Online-Veranstaltung NV-ProVi am 06.10.2021 ● Vortrag mFUND-Konferenz am 19.10.2021 ● Pressemitteilung zum Projektabschluss veröffentlicht am 26.10.2021 ● Veröffentlichung in der Fachzeitschrift UdZ, Ausgabe 2-2021 ● Bereitstellung von Daten in der mCLOUD 	
--	--	--	--

Detaillierte Ergebnisdarstellung der einzelnen Arbeitspakete:

Arbeitspaket 1 - Entwicklung und Validierung der Use-Cases

Für die Identifizierung von Use Cases, in der die AirQuality-Lösung Anwendung findet, wurden sowohl einzelne als auch gemeinsame Workshops mit den Städtepartnern Aachen, Halle an der Saale und Gelsenkirchen durchgeführt.

Zunächst wurden einzelne Workshops mit den Städten durchgeführt, um das Projektvorhaben vorzustellen und Anforderungen aufzunehmen. Um die Situation der Städtepartner besser zu verstehen, wurde sich an dem Kundenprofil, wie es im Value Proposition Canvas von Osterwalder und Pigneur aufgezeigt ist (OSTERWALDER ET. AL 2014), orientiert. Zur Erstellung des sogenannten „Städteprofils“ wurde den Fragen nachgegangen, welche Aufgaben Städte im Bereich Luftreinhaltung haben, welchen Herausforderungen sie dabei begegnen und welche Ziele sie verfolgen. Darüber hinaus wurden vergangene und aktuelle Projekte der Städte diskutiert, um festzustellen, welche dieser Projekte erfolgreich und welche weniger effektiv waren. Diese Ergebnisse wurden anschließend zur Erarbeitung von Vorschlägen, wie mit AirQuality eine Lösung oder eine Verbesserung erwirkt werden kann, genutzt.

Durch dieses Vorgehen sind vier Use Cases identifiziert worden, welche für Städtepartner von Interesse sind. In einem gemeinsamen Workshop mit allen Städtepartnern wurden die Use Cases vorgestellt und ihre Relevanz und Machbarkeit diskutiert:

1) Identifikation und Reduzierung von Orten hoher Feinstaubbelastung

Für die Umsetzung dieses Use Cases wurde die Heatmap, welche die erfassten Parameter darstellt, entwickelt. Um die Anwenderfreundlichkeit zu gewährleisten, wurde die Visualisierung den jeweiligen Städten als potenzielle Nutzer präsentiert und ihr Feedback aufgenommen. Die Heatmap ermöglicht es, die Luftqualität im Stadtgebiet zu verschiedenen Tageszeiten nachvollziehen zu können. Änderungen der Feinstaubbelastung durch ggf. umgesetzte Maßnahmen lassen sich so objektiv bewerten.

2) Erstellung von Thermalbildern

Mit diesem Anwendungsfall kann eine hohe Kosteneinsparung erzielt werden. Um die Verteilung von warmer und kalter Luft in Städten nachvollziehen zu können, werden bislang Flugzeuge eingesetzt, die das Stadtgebiet überfliegen und dabei mit einer Wärmebildkamera Aufnahmen machen. Da dieses Vorhaben mehrere Millionen Euro kostet und sehr aufwendig ist, werden solche Flüge selten gemacht. Mit AirQuality hingegen könnte man über einen festgelegten Zeitraum und definierte Routen Fahrzeuge gezielt im Stadtgebiet fahren lassen, um solche Daten zu gewinnen. Damit weicht dieser Use Case von der ursprünglichen Idee AirQualitys, nämlich der Verwendung von Flotten welche ohnehin im Stadtgebiet unterwegs sind, ab. Dennoch ist dies eine kostengünstigere und flexiblere Lösung, die für Städte attraktiv ist.

3) Beurteilung der Umgebungsluft bei Bauprojekten

Der Anwendungsfall „Beurteilung der Umgebungsluft bei Bauprojekten“ baut auf der Heatmap auf. Es ist jedoch vorstellbar, stationäre Sensoren oder auch einzelne, mobile Sensoren zu nutzen, um die Umgebungsluft in bestimmten Gebieten gezielter zu untersuchen.

4) Routenoptimierung für täglich frische Luft

Der Anwendungsfall benötigt einen Applikationsentwickler, der die gewonnenen Daten in eine Anwendung überführt, welche den Nutzern optimierte Fuß- und Radwege auf Basis der Luftqualität vorschlägt. Dieser Anwendungsfall ist zwar interessant, ist in der Umsetzung allerdings wesentlich komplexer und Bedarf einer konstanten Datenverfügbarkeit.

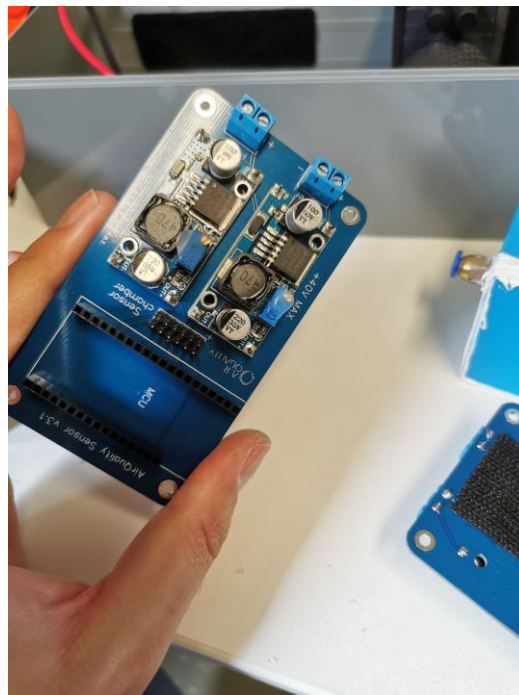
Arbeitspaket 2 - Entwicklung der Sensorik-Hardware

Zum Messen der Luftqualität werden zwei unterschiedliche Sensoren verwendet. Einer davon ist der BME280. Dies ist ein Sensor von Bosch, der Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit messen kann. Der zweite verwendete Sensor trägt die Bezeichnung PMS5003 und misst den Feinstaubgehalt der Luft. Um verlässliche Daten zu messen, ist dieser Sensor gleich zweifach in der Sensoreinheit verbaut. Die drei Sensoren sind in einer luftdichten Kammer platziert. Zusätzlich dazu wurde eine Pumpe eingebaut, die durch einen Schlauch Luft von außerhalb der Kammer anzieht, um einen stetigen Luftstrom zu generieren.

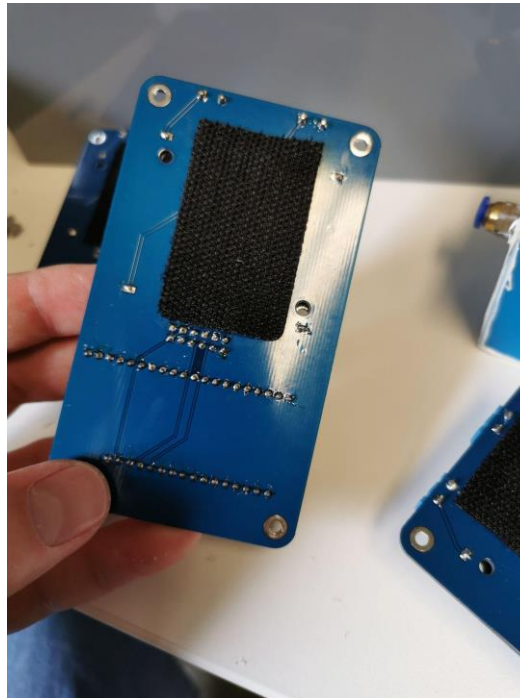
Für die Kommunikation zwischen ESP-Controller und BME-Sensor wird das I²C-Protokoll verwendet, die PMS-Sensoren spricht der ESP über UART an. Der ESP sitzt auf einer eigens entwickelten Platine. Diese Platine ist mit zwei Spannungsreglern (12V für die Stromversorgung der Pumpe, 5V für die Stromversorgung der Sensorik und des ESPs) und dem ESP32 ausgestattet und verbindet die Sensorik mit dem Mikrocontroller.

Im Folgenden wird der Zusammenbau des AirQuality-Sensors beschrieben:

- Drucken der Vakuumkammer mit dem 1.2-fachen Flow
- Aufsetzen der Arduino IDE wie im [GitHub Repository](#) beschrieben
- Anlöten aller Bauteile auf der Platine
- Einstellung der Spannungsregler auf 12 Volt (oben) und 5 Volt (unten, ESP32 vorher entfernen)



- Fixieren der Potentiometer der Spannungsregler mit Heißkleber
- Zurücksetzen und flashen des ESP32 wie im [GitHub Repository](#) beschrieben
- Anbringung von Klettband an der Rückseite der Platine und an der Seite der Box



- Vorbereitung von ca. 2 Meter langen Stromkabeln
- Vorbereitung des Kabelbaums für die Vakuumkammer:

Für die *PMS-5003-Sensoren*:

Alle Kabel des PMSs außer VCC, GND, RX und TX entfernen und weibliche Crimpheder an den überbleibenden vier Kabeln anbringen.

Pin Definition

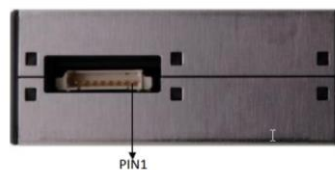
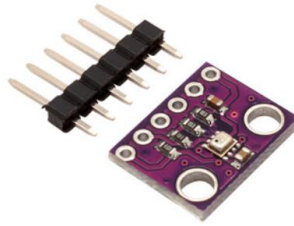


Figure 2 Connector Definition

PIN1	VCC	Positive power 5V
PIN2	GND	Negative power
PIN3	SET	Set pin /TTL level @3.3V. high level or suspending is normal working status, while low level is sleeping mode.
PIN4	RX	Serial port receiving pin/TTL level@3.3V
PIN5	TX	Serial port sending pin/TTL level@3.3V
PIN6	RESET	Module reset signal /TTL level@3.3V. low reset.
PIN7/8	NC	

Für den *BME280*-Sensor:

4 Jumperkabel verwenden und Gehäuse der Header an einer Seite entfernen.



2x6 Dupont-Connector als Gehäuse für alle 10 Kabel, Anordnung wie in der folgenden Grafik:

- Mount the 2x6 DuPont connector to the wires based on the following table:

5V	5V
5V	GND
GND	GND
PMS1 RX	PMS2 RX
PMS1 TX	PMS2 TX
BME SCL	BME SDA

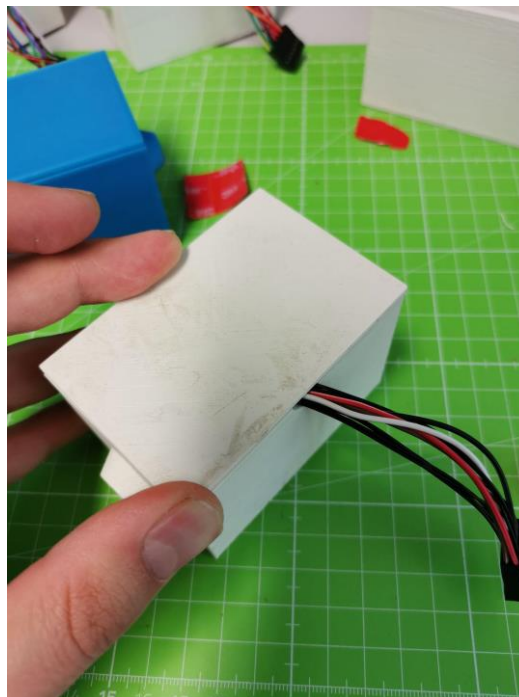
- BME mit dem fertigen Kabelbaum verbinden, doppelseitiges Klebeband verwenden, um den Sensor an den Lufteingang der Vakuumkammer anzubringen



- Verbindung der beiden PMS mit dem Kabelbaum, Fixierung mit doppelseitigem Klebeband an dem Boden der Kammer (Sensoren gegenläufig ausrichten)



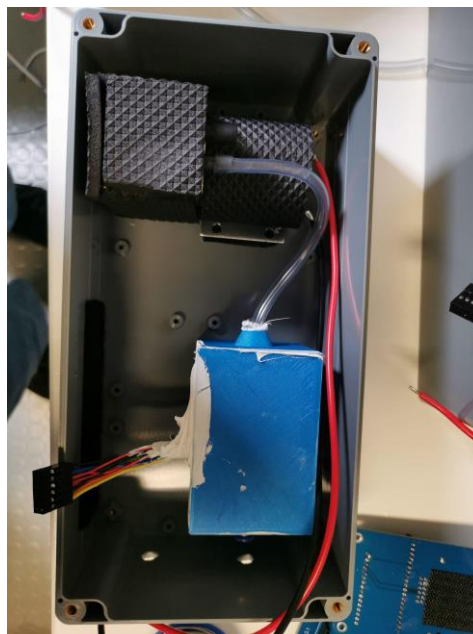
- Kabel durch das obere Loch führen, fixieren des Deckels mit Silikon oder SikaFlex (luftdicht)



- Verteilung der Dichtungsmasse auf dem Gewinde der Schlauch-Connectoren, Eindrehen in das vorgesehene Loch der Vakuumkammer
- Verteilung der Dichtungsmasse auf einem Stück Schlauch, Einstecken in das andere Loch der Vakuumkammer

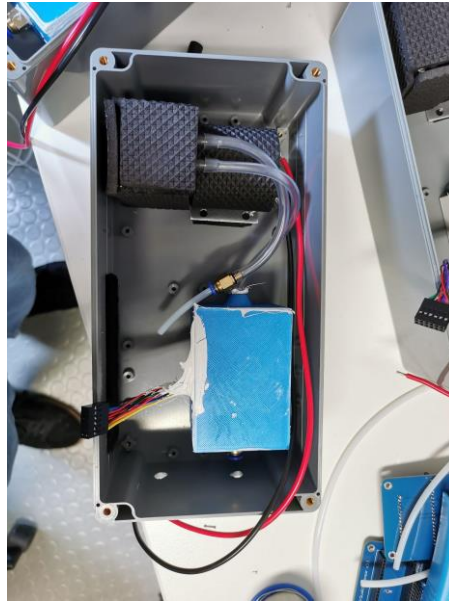


- Bohren von Löchern in die Box des Sensors für die Kabel und den Schlauch
- Doppelseitiges Klebeband anbringen, um die Vakuummkammer in der Box zu befestigen
- Kabel an die Pumpe löten, Isolieren der Pumpe mit Schaumstoff, um Lautstärke zu reduzieren
- Pumpe mit doppelseitigem Klebeband in die Box kleben
- Schlauch der Vakuummkammer auf den Lufteingang der Pumpe stecken



- Schlauch auf den Luftausgang der Pumpe stecken, Schlauch Connector an dem anderen Ende des Schlauchs anbringen

- Schmalen Schlauch am Schlauch Connector anbringen (die Pumpe dient so zusätzlich als aktive Kühlung der Spannungsregler)



- Stromkabel, Pumpe und die Vakuumpumpe mit der Platine verbinden; Anbringen in der Box



- Fixierung des Stromkabels mit Heißkleber (Zugsicherung)
- Schlauch an dem Schlauch Connector der Vakuumpumpe anschließen (Anpassung der Länge des Schlauchs an den Einsatzbereich)

Arbeitspaket 3 - Identifikation möglicher Fahrzeugflotten

Bei der Auswahl möglicher Fahrzeugflotten ergibt sich die wesentliche Herausforderung in der Gewährleistung einer zuverlässigen Flächenabdeckung des Stadtgebiets. Nach ausführlicher Analyse mehrere Fahrzeugflotten und ihrer Eigenschaften (siehe Tabelle 4) wurden für die Stadt Aachen die Fahrzeuge der Aachener Straßenbahn und Energieversorgungs-AG (ASEAG) ausgewählt. Die Busse des ÖPNV-Anbieters sind täglich von morgens bis abends im gesamten Stadtgebiet unterwegs, sodass man davon ausgehen kann, dass die Busse im Vergleich zu anderen Fahrzeugtypen eine größtmögliche Abdeckung erreichen können. Ein Nachteil ist jedoch, dass die Fahrzeuge auf unterschiedlichen Routen eingesetzt werden und dabei teilweise auch das Stadtgebiet verlassen. Zum anderen gestaltet sich die Abdeckung von Nebenstraßen und öffentlichen Plätzen (z. B. Marktplätze, Fußgängerzonen) als problematisch. Bei letzterem ergibt sich jedoch die Frage, inwiefern eine Luftqualitätsdatenerfassung in diesen Gebieten sinnvoll ist. Die Ergänzung durch die Ausstattung von beispielsweise Taxen, Fahrzeugen des Ordnungsamtes oder der städtischen Straßenreinigung mit Sensorik kann zu einer höheren Abdeckung von Nebenstraßen beitragen. Allerdings sprechen der unregelmäßige Einsatz und ihre oftmals nicht vorhersehbaren Routen (vor allem bei Taxen und Fahrzeugen des Ordnungsamtes) gegen eine regelmäßige Befahrung mancher Straßen. Deswegen kann das AirQuality-Messnetz auch um stationäre Sensoren erweitert werden, um bei Bedarf wichtige öffentliche Plätze, die nicht für motorisierte Fahrzeuge zugänglich sind, zumindest punktuell erfassen zu können.

In der Stadt Halle an der Saale stellen Straßenbahnen die geeignete Fahrzeugflotte dar, da diese die innerstädtischen Hauptverkehrsadern abfahren. Busse erfüllen eher eine Zubringerfunktion der Vororte. Auch bei den Straßenbahnen besteht die Herausforderung, dass die Fahrzeuge auf verschiedenen Routen eingesetzt werden. Um dem entgegenzuwirken, wurde überlegt Übungsfahrten der Straßenbahnfahrschule gezielt auf Strecken einzusetzen. Zwar sagte die Stadt Halle an der Saale einem Einbau der Sensorik zu, doch aufgrund der durch Corona-bedingten Reisebeschränkungen war eine Besichtigung der Straßenbahnen zunächst nicht möglich. Hinzu kam, dass der interne Entscheidungsprozess des Nahverkehrsbetreibers, ob man dem Einbau zustimme, lange dauerte und die Projektlaufzeit begrenzt war. Deswegen konnte während der Projektlaufzeit keine Sensoren in den Straßenbahnen verbaut werden.

Tabelle 4: Fahrzeugflotten und Bewertung der Eignung für den Einsatz mobiler Datenerfassung

Fahrzeugflotten	Routen	Regelmäßigkeit der gefahrenen Route	Häufigkeit des Betriebs einzelne Fahrzeuge	Benötigte Fahrzeuge, um Abdeckung zu erreichen	Anmerkungen
Cambio	Haupt- und Nebenstraßen	- Sehr unregelmäßig - Nach Bedarf	Täglich	Viele	- Sehr hohe Unregelmäßigkeit - Nicht planbar
Leih-Fahrrad (wenn elektrisch)	Haupt- und Nebenstraßen	- Sehr unregelmäßig - Nach Bedarf	Häufig	Viele	- Sehr hohe Unregelmäßigkeit - Nicht planbar - Montage des Sensors unklar
Leih-Roller (Lime, Hive, Tier o.ä.)	Haupt- und Nebenstraßen	- Sehr unregelmäßig - Nach Bedarf	Häufig	Viele	- Sehr hohe Unregelmäßigkeit - Nicht planbar - Montage des Sensors unklar
Lieferdienste	Haupt- und Nebenstraßen	- Unregelmäßig - Nach Bedarf	Täglich	Viele	- Hohe Unregelmäßigkeit - Hauptsächlich abends unterwegs - Hohe Abdeckung möglich
Kehrmaschine/ Müllabfuhr	Haupt- und Nebenstraßen	- Regelmäßig - Feste Route	Selten	Wenige	- Einsatz planbar - Befahren i.d.R. Straßen nur einmal täglich, meist zur selben Uhrzeit - Hohe Abdeckung möglich
Taxiunternehmen	Haupt- und Nebenstraßen	- Unregelmäßig - Nach Bedarf	Häufig	Mittel	- Sehr hohe Unregelmäßigkeit - Nicht planbar - Hohe Abdeckung möglich
Polizei (Streife), Ordnungsamt	Haupt- und Nebenstraßen	- Unregelmäßig - Keine feste Route	Täglich	Mittel	- Sehr hohe Unregelmäßigkeit - Nicht planbar - Mögliche Abdeckung unklar
Postauto/-fahrrad (bspw. Streetscooter)	Haupt- und Nebenstraßen	- Regelmäßig - Feste Route	Fast täglich	Wenige	- Befahren i.d.R. Straßen nur einmal täglich, meist zur selben Uhrzeit - Theoretisch komplettes Stadtgebiet planbar abdeckbar
Paketdienste	Haupt- und Nebenstraßen	- Regelmäßig - Feste Route	Fast täglich	Wenige	- Befahren i.d.R. Straßen nur einmal täglich, meist zur selben Uhrzeit - Theoretisch komplettes Stadtgebiet planbar abdeckbar
Bus	Hauptstraßen	- Sehr regelmäßig - Feste Route	Häufig	Wenige	- Keine Erfassung aller Nebenstraßen - Großteil des Stadtgebiets abdeckbar - Täglich unterwegs - Keine festen Routen der Fahrzeuge
Stadt-Bahn	Hauptstraßen	- Sehr regelmäßig - Feste Route	Häufig	Wenige	- Keine Erfassung aller Nebenstraßen - Großteil des Stadtgebiets abdeckbar - Meist "gefährdete" Straßen abgedeckt

Arbeitspaket 4 - Aufbau eines mobilen IoT-Netzwerks

1. Ausgangslage, Ziel und Rahmenbedingungen

Mit der Entwicklung der Hardware als auch der Ausstattung der nötigen Fahrzeugflotte mit den Sensoren ist es möglich, IoT-Daten während der Linienfahrten der Busse zu sammeln. Ziel ist es, die Daten so vorzubereiten, dass diese in einer grafischen Oberfläche dargestellt werden können. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 3 aufgezeigt. Im Folgenden wird auf die Art und Weise der Datenerfassung, -übermittlung und -aufbereitung mittels Cloud Computing eingegangen.

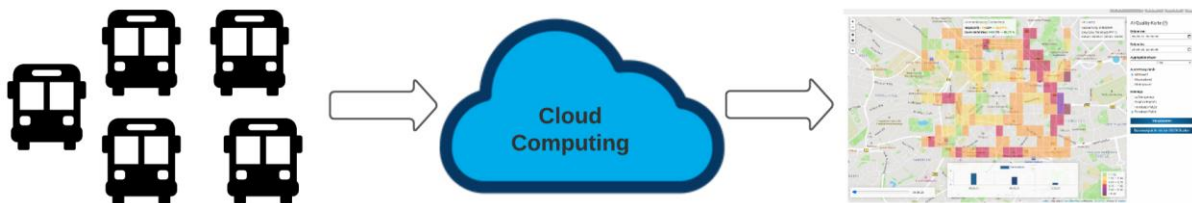


Abbildung 3: vereinfachte Darstellung des Datenflusses

Die Rahmenbedingungen sind wie folgt:

- Der Sensor misst mit 1 Hz (einmal pro Sekunde) die Luftqualitätswerte und sendet bei einer Veränderung des gemessenen Wertes diesen in Richtung eines Cloud Computing-Anbieters
- GPS-Positionsdaten werden mit bis zu 1 Hz geloggt bei Richtungs- und Geschwindigkeitsänderungen

Die Hypothese ist wie folgt:

- Das Verknüpfen von Sensorwerten auf interpolierte Positionsdaten erreicht die notwendige Genauigkeit im Vergleich zu der Berechnung von Positionsdaten pro Sensorwert

2. Datenflussarchitektur

Die untenstehende Abbildung 4 zeigt einen Überblick der Schritte von der Datenentstehung bis zur Datenbereitstellung für das Add-In.

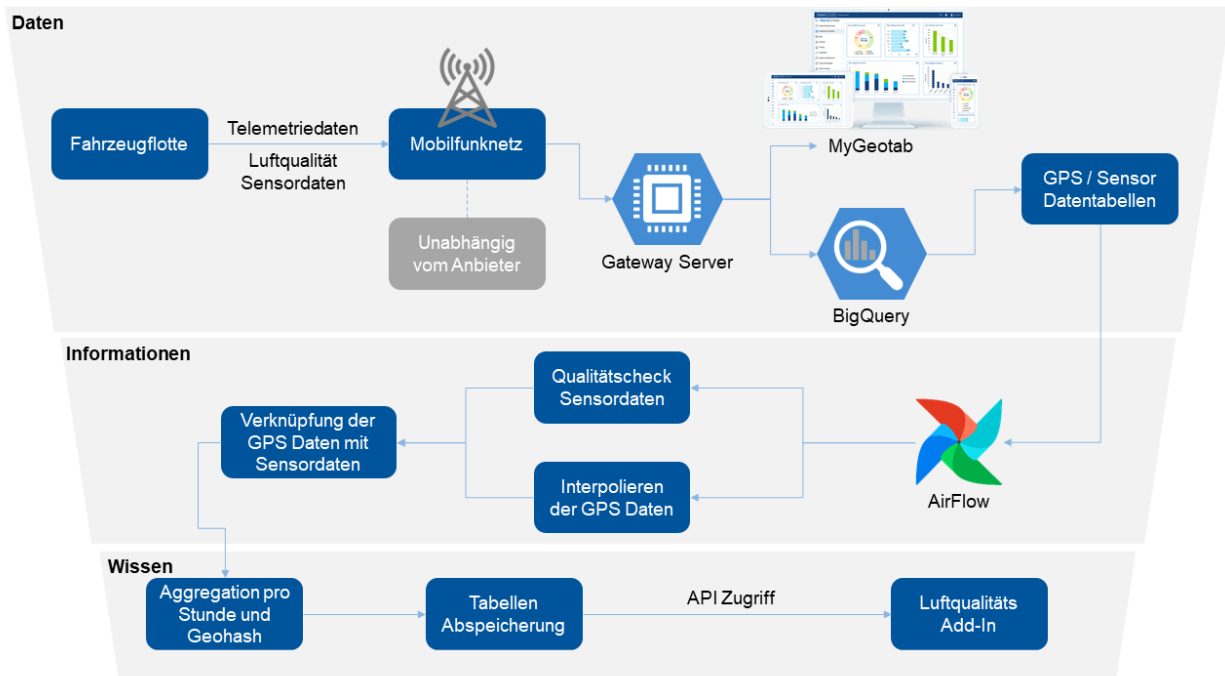


Abbildung 4: Schritte von der Datenentstehung bis zur Datenbereitstellung

Die Daten werden über den Sensor gesammelt und anschließend an das GO-Gerät übermittelt, welches über das mobile Telefonnetz mit dem Eingangsserver (Gateway-Server) verbunden ist. Dieser ist für die Sammlung und Verteilung der Daten zuständig. Von dort gelangen die Daten sowohl in die Flottenmanagement-Lösung MyGeotab als auch in das vollständig verwaltete Data Warehouse BigQuery auf der Google-Cloud-Plattform (GCP). Die Plattform erlaubt es, mit einfachen Anfragen große Datenmengen zu filtern und weiter zu bearbeiten.

Die Sensordaten sowie Positionsdaten werden in verschiedenen Tabellen gespeichert und dann durch Apache Airflow aufbereitet, einer auf Python basierenden Open-Source-Workflow-Management-Plattform für wiederkehrende Prozesse.

Die einzelnen Airflow-Schritte, auf die in Teil 3 „Datenvorverarbeitung“ weiter eingegangen werden, kombinieren und aggregieren die Daten und speichern diese wieder in BigQuery ab. Ein API-Zugriff via einen GCP-Service ermöglicht den Zugriff auf die Daten. API steht für „Application Programming Interface“ und ist damit die Programmierschnittstelle für die Anbindung von anderen Systemen. Somit erhält das Add-In Zugriff auf die vorprozessierten Daten und kann diese je nach Wunsch darstellen.

3. Datenvorverarbeitung

Für die Datenvorverarbeitung werden 3 wesentliche Schritte ausgeführt:

- 1) Filterung der Ausgangsdaten durch Zuordnung der Sensordaten zu den richtigen Fahrzeugen und die Filterung von nicht realistischen Werten (s. Abbildung 5: Schritt 1)
- 2) Verknüpfung der Sensordaten mit Positionsdaten für eine höhere Auflösung durch die Annahme, dass jede Änderung korrekt übertragen wurde in rot, sowie die Interpolation zwischen den Positionsdaten in grün für eine passende Auflösung pro Geohash (s. Abbildung 6: Schritt 3)
- 3) Aggregation pro Geohash und Zeiteinheit auf gewisse Kennwerte wie der Durchschnitt, Min. und Max (s. Abbildung 7: Schritt 3)

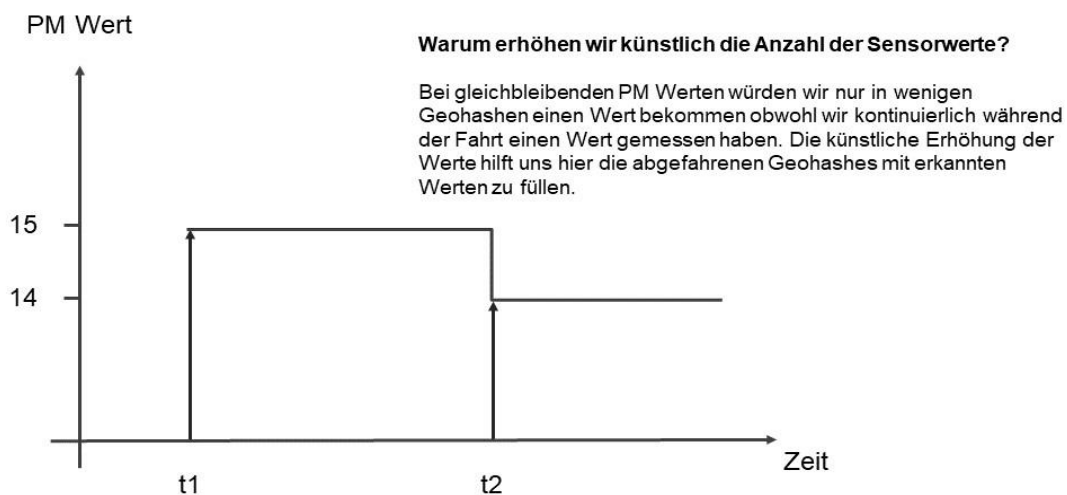


Abbildung 5: Gefilterte Sensordaten mit Zeitstempel mit dem Potential auf eine Interpolation (Schritt 1)

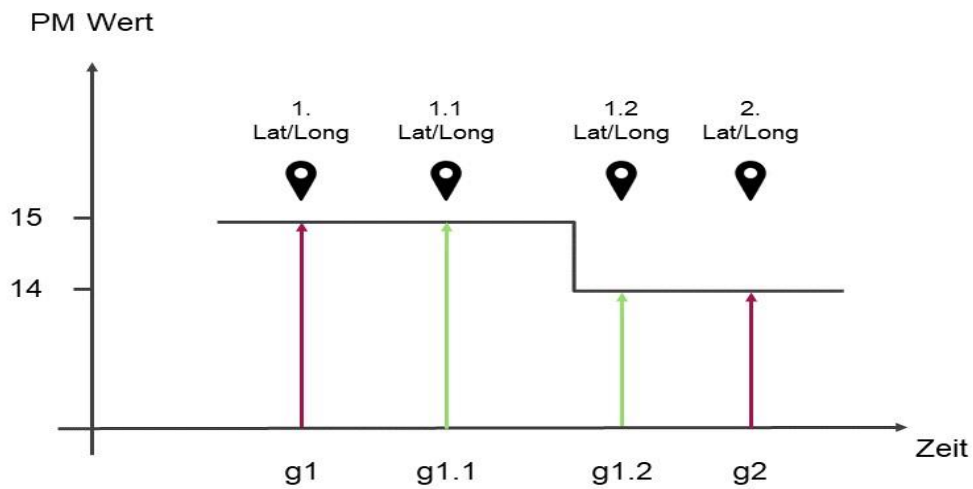


Abbildung 6: Verknüpfung der Sensordaten mit Positionsdaten in rot und interpolierte Sensordaten in grün (Schritt 2)

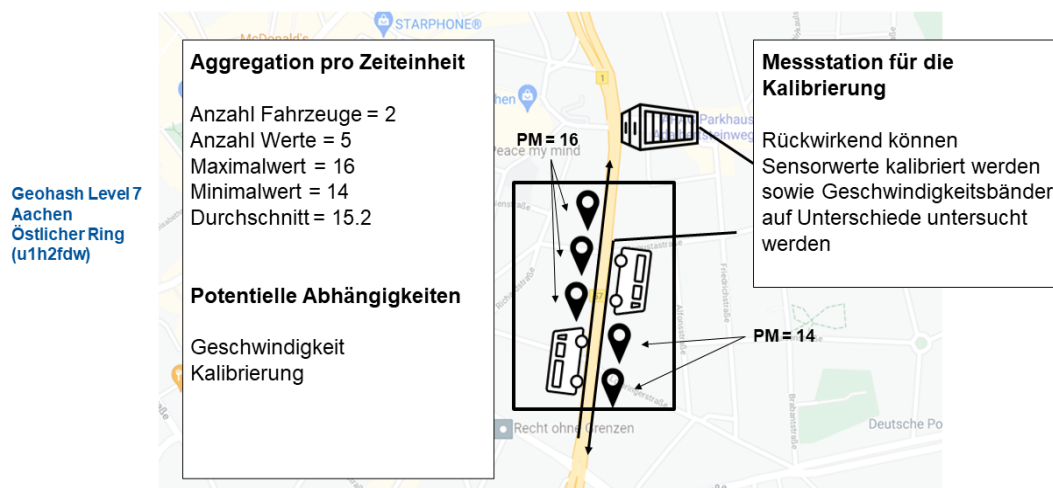


Abbildung 7: Aggregation pro Geohash und Zeiteinheit auf gewisse Kennwerte (Schritt 3)

Im Projektvorhaben wurden 15 Busse des Aachener ÖPNV-Anbieters mit der in Arbeitspaket 2 beschriebenen Sensorik und einem Geotab GO-Device ausgestattet. Durch die zuvor beschriebene Datenarchitektur bildet sich so ein mobiles IoT-Netz, welches die Daten erfasst und verarbeitet. Die aggregierten Daten können abschließend in der Heatmap (s. Arbeitspaket 5) visualisiert werden.

Arbeitspaket 5 - Erstellung feinräumiger Luftqualitätskarten zur Auswertung der Emissionen

Für die Auswertung bzw. grafische Darstellung der Messdaten im MyGeotab-Portal wurde zusätzliche Software (das **AirQuality-Add-In**) entwickelt. Dabei wurden folgende Bibliotheken verwendet:

1. Kartendarstellung auf Basis von OpenStreetMap / Mapbox
2. Framework: open-source JavaScript-Bibliothek Leaflet

Als Basis für die Darstellung der Messdaten wurde die Einheit **Geohash der Größe 7** ausgewählt:

- Ein Geohash ist eine rechteckige Zelle auf der Karte
- Die ausgewählte Größe beträgt 153m x 153m

Das Add-In bietet folgende Optionen:

- Zeitfenster und Aggregationsdauer
 - Wenn das ausgewählte Zeitfenster größer als 24 Stunden beträgt, werden die Sensorwerte zu Tageswerten aggregiert
 - Wenn das ausgewählte Zeitfenster kleiner als 24 Stunden beträgt, können die Sensorwerte in Clustern zu 15, 30 und 60-Minuten aggregiert werden
- Folgende Datentypen können ausgewählt werden (alle Werte kommen von dem AirQuality-Sensor):
 - Lufttemperatur
 - Relative Feuchte
 - Feinstaub PM2.5
 - Feinstaub PM10

Es gibt zwei verschiedene Methoden, die Daten auf die Karte plotten zu lassen:

1. Visualisierungsmethode: Hier werden die aggregierten Daten einzelnen Geohashes zugewiesen und auf die Karte geplottet.

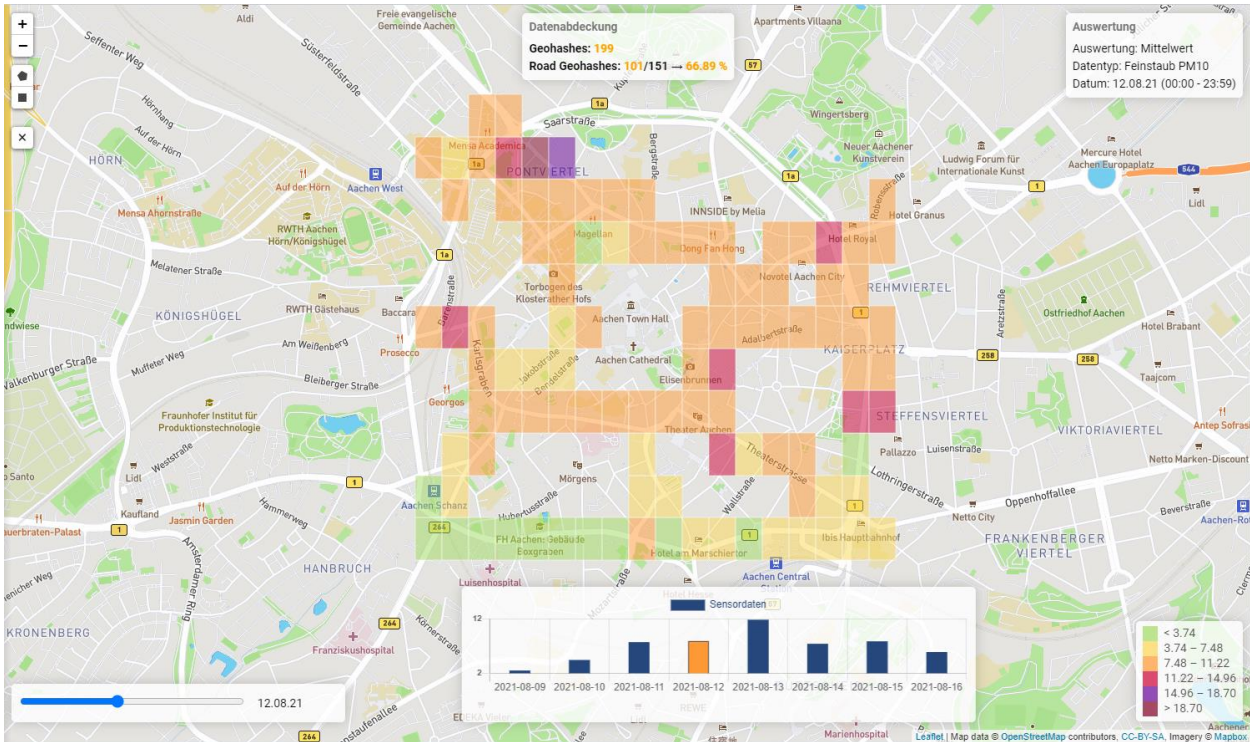


Abbildung 8: Darstellung der aggregierten Daten mit Geohashes

2. Datenvergleich mit der VACW-Station: Hier werden die aggregierten Daten mit den entsprechenden Sensordaten der LANUV-Station [VACW](#) (Wilhelmstraße 22/24, 52070 Aachen) verglichen. Da die LANUV-Station die Daten nur stündlich liefert, werden die Sensordaten entsprechend aggregiert. Der Schieberegler im Add-In (unten links in Abbildung 9) kann benutzt werden, um die Daten für einen bestimmten Zeitraum darstellen zu lassen – so ist es möglich, die Änderung der Sensordaten zu verfolgen.

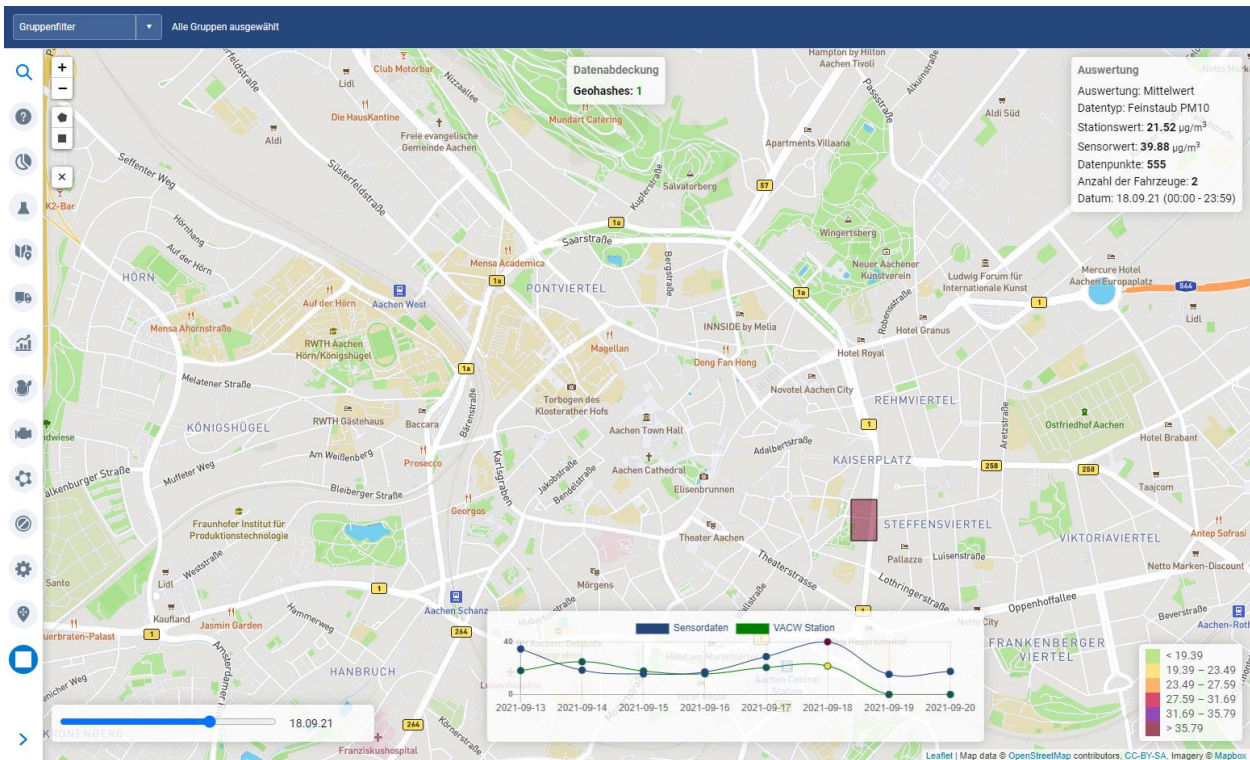


Abbildung 9: Datenvergleich mit der VACW-Station

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Durch die intensive Projektarbeit sowie Vor- und Nachbereitung der Workshoptermine sind die Personalkosten der größte und relevanteste Bestandteil der Kosten von Seiten des FIR. Die Hauptpositionen der Ausgaben von Seiten Geotab bestehen neben den Personalausgaben aus Kosten für die Hardware, die benötigt wurden, um den Sensor zu entwickeln.

Kosten für Dienstreisen sind, anders als ursprünglich gedacht, nicht entstanden. Durch die Covid-19 Pandemie waren Dienstreisen ab Anfang 2020 nicht mehr möglich, sodass die meisten Veranstaltungen digital durchgeführt wurden. Auch, wenn durch die digitalen Veranstaltungen der Austausch und die Diskussion nicht so gelebt werden konnten wie bei einer physischen Veranstaltung, so bieten sie dennoch ihre Vorteile. Beispielsweise nahmen am *AirQuality Summit*, welcher am 15.04.2021 digital durchgeführt wurde, über 90 Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus der ganzen Welt teil. Beim *AirQuality-Day* am 18.08.2021 waren es 55 Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus ganz Deutschland.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Entwicklung und Implementierung der Lösung des Forschungsprojektes ist eine wissenschaftlich und technisch komplexe Aufgabe, die viele Kompetenzen und erhebliche personelle und finanzielle Ressourcen erfordert. Um den Ressourcenbedarf hierfür zu minimieren, wurde das Projekt AirQuality im interdisziplinären Verbund von Industrie und Forschung umgesetzt, Kompetenzen wurden gebündelt und Synergien erzielt. Die Diskussionen und der Austausch mit anderen Unternehmen der Branche, Forschungsprojekten und Städtepartnern, haben die Relevanz des Forschungsprojektes bestätigt. Der Grund, warum dieses Thema zuvor noch nicht von anderen Unternehmen angegangen wurde, besteht darin, dass es genau einem solch interdisziplinären Konsortium und einer Idee zur Breitenwirksamkeit der Lösung fehlte. Beides ist durch das Forschungsvorhaben AirQuality gegeben, nicht aber durch Einzelinitiativen von Unternehmen. In der Überzeugung des Projekterfolgs haben die Partner beträchtliche Eigenanteile in das Projekt eingebracht.

Neben dem Innovationscharakter verstärkt insbesondere die Geschäftsmodellkonzeptionierung für die unterschiedlichen Interessensgruppen die Komplexität des Vorhabens. Die mit der Projektdurchführung verbundenen Risiken sind mit dem gewählten Ansatz und den eingebundenen Partnern nicht gänzlich vermeidbar, jedoch beherrschbar gewesen.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die nachfolgende Tabelle 5 führt die zu Projektbeginn geplanten wissenschaftlichen, datenbezogenen und wirtschaftlichen Ergebnisverwertungen auf und stellt diese der tatsächlichen Verwertung gegenüber.

Tabelle 5: Verwertungsplan

Geplante Verwertung	Tatsächliche Verwertung
Wissenschaftlich:	
Publikation der Zwischenergebnisse im Internet	Siehe Kapitel 2.6
Wissenschaftliche Publikationen	
Institutsinterne Publikationen des FIR	
Präsentation der Zwischenergebnisse auf wissenschaftlichen Tagungen	
Datenbezogen:	
Feingranulares Kartenmaterial mit einer Auflösung von 150 x 150 Metern	Wahl des Codierungssystems "Geohashes"; Geohashes der Größe $7 \triangleq 153\text{m} \times 153\text{m}$
Interaktives Dashboard mit Darstellung der wichtigsten Luftqualitätskennzahlen	In Testumgebung umgesetzt
Erkennung von Mustern mittels AI (Artificial Intelligence)	Konnte nicht während der Projektlaufzeit angegangen werden, da der Fokus zunächst auf Entwicklung der Sensorik und Datenvalidierung lag; Wird aber bei der Weiterverwertung nach Förderungszeit thematisiert
Datennutzung gemäß den im AP1 entwickelten Use-Cases	Konnte nicht während der Projektlaufzeit realisiert werden, da zunächst die Abdeckung und Datenverfügbarkeit gewährleistet werden mussten. Sobald ein Anwendungspartner gefunden wurde, sollen Use Cases mit Hilfe der Daten umgesetzt werden
Nutzung als Grundlage für eine optimierte Verkehrssteuerung	Der Betreiber der Lichtsignalanlagen in Aachen hat derzeit kein Interesse an einem solchen Projekt. Verkehrssteuerung auf Grund von Umweltdaten ist ein sehr komplexes Thema, welches gründliche Vorbereitungen benötigt. Deswegen wird dieses Vorhaben vermutlich erst zu einem späteren Zeitpunkt umsetzbar sein.

Wirtschaftlich:	
Ausrollung auf weitere Städte (zunächst Halle an der Saale und Gelsenkirchen)	Während der Projektlaufzeit konnte nur die Stadt Aachen mit Sensoren ausgestattet werden. Es werden Gespräche mit anderen Interessensgruppen geführt, die Interesse an der Nutzung der Sensoren haben. Diese können aus Vertraulichkeitsgründen hier jedoch nicht weiter erläutert werden.
Validierung der benötigten Fahrzeugmenge aufgrund anderer Stadtstrukturen	Konnte während der Projektlaufzeit nicht umgesetzt werden; Auch nach der Förderzeit sollen die Sensoren an Interessensgruppen ausgegeben werden, sodass zu einem späteren Zeitpunkt hierzu eine konkretere Aussage getroffen werden kann.
Die Ableitung von Handlungsempfehlungen basierend auf der entstandenen Heatmap	Während der Projektlaufzeit stand der Fokus auf der Entwicklung der Visualisierung und Sicherstellung der Abdeckung. Für eine Analyse müssen genügend historische Daten zur Verfügung stehen, sodass die Ableitung von Handlungsempfehlungen nach der Förderungszeit angegangen wird.
Die Entwicklung eines digitalen Service auf Grundlage der Luftqualitätskarten und/oder -daten, welches langfristig zur Besserung der Luftqualität beitragen soll	Wird nach der Förderungszeit in den Fokus gesetzt, mit dem Ziel einer wirtschaftlich tragfähigen Lösung. Hierfür wird ein Geschäftsmodell entwickelt, welches das Angebot und die Nachfrage an großflächig verfügbaren Datenpunkten reguliert.
Bereitstellung der Daten für andere Projekte	Aggregierte Daten wurden auf der mCLOUD öffentlich zugänglich gemacht und sollen städteübergreifend bei dem Ausrollen ähnlicher Konzepte unterstützen.
Anbindung anderer Fahrzeugtypen an das Messdatensystem (Wo kann der Sensor platziert werden, um zuverlässig valide Daten zu sammeln?)	Der Sensor wurde testweise bereits auf Privatfahrzeugen des AirQuality-Teams verbaut. Die Ausstattung einer größeren Anzahl von Pkws oder Bahnen wird nach Förderzeit weiterverfolgt.
Öffentlichkeitsarbeit: Siehe Kapitel 2.6	

Begleitforschung:	
Regelmäßiger fachlicher Austausch durch Arbeitsforen und andere Vernetzungstreffen im Rahmen der mFUND Förderinitiative	Die Möglichkeit der Vernetzung mit weiteren mFUND geförderten Projekten und mFUND initiierten Aktivitäten wurde genutzt. Vor allem mit den Projekten FAIR, DEUS und mAiQNet fand ein regelmäßiger Austausch statt. Es wird in Erwägung gezogen mit dem Projekt NV-ProVi zu einem späteren Zeitpunkt über die Möglichkeit, Busse als mobile Datensammler zu nutzen, zu sprechen. Siehe auch Kapitel 1.5 und 2.6
Übertragbarkeit auf das Bundesgebiet:	
Ergebnisse für andere Interessengruppen zur weiteren Verwertung zur Verfügung stellen	Bereitstellung von Daten über die mCLOUD ; Veröffentlichung der Forschungsergebnisse (siehe Kapitel 2.6); Austausch und Diskussionen mit Interessensgruppen wird auch nach Förderzeit weiter befürwortet;
Erweiterung des Sensorstack um weitere Sensorik, um der Nachfrage neu aufkommender Faktoren gerecht zu werden	Es wird weiterhin nach einer Lösung gesucht, NOx zuverlässig mobil mit Niedrigpreissensoren zu erfassen. Zusätzlich wird versucht, VOC zu messen.

2.5 Der während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Das positive Feedback der Städtepartner zeigt die Relevanz des Vorhabens AirQuality. Auch andere Teams und Projekte arbeiteten an einer Lösung zur mobilen Datenerfassung, beispielsweise Google Earth Outreach. Das Projekt Breathe London setzte eine kleine Menge Fahrzeuge zur Erfassung von Luftqualitätsdaten ein. Das mFUND geförderte Projekt mAiQNet beschäftigte sich mit dem Einsatz von NO₂-Sensoren in Taxen. Auch DEUS, ein weiteres mFUND-gefördertes Projekt, erprobt die Verwertung mobiler Umweltdaten. Diese Initiativen verdeutlichen, dass der mobile Einsatz von Sensoren ein relevantes Forschungsgebiet ist. Durch den Austausch und das Konsolidieren von Erfahrungsberichten zeigt sich aber auch, dass die Umsetzung einige Hürden mit sich bringt. Die optimale Lösung für mobile Sensoreinheiten ist bisher noch nicht entwickelt. Mit dem Forschungsvorhaben AirQuality konnten weitere Erkenntnisse gewonnen werden, die einen Beitrag zu dem relevanten Forschungsthema leisten.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Erfolgte Veröffentlichungen:

Pressemitteilung zum Projektstart veröffentlicht am 26. November 2020 unter:

<https://www.fir.rwth-aachen.de/newsroom/pressemitteilungen/detail/news/fir-und-geotab-untersuchen-luftqualitaet-in-echtzeit-mit-mobilen-fahrzeugflotten/>

- Masterarbeit an der Universität Maastricht: Titel "*Business model development for a vehicle based ambient air quality monitoring - a case study in Aachen, Germany*"
- Pitch des Projektes bei der Smart City Fokusgruppe der Mainzer Stadtwerke am 1.12.2020
- Kolloquium Luftqualität an Straßen 2021: Online-Veranstaltung am 24. und 25. März 2021. Vorstellung des AirQuality-Projektes sowie Beitrag bei der Ausstellerseite und Beitrag im Tagungsband; Präsentation von Zwischenergebnissen.
- AirQuality Summit am 15. April 2021: internationales Fachkolloquium zum Thema innovative Ansätze der Luftqualitätsdatenerfassung und -bearbeitung.
- AirQuality-Day am 18. August 2021: Abschlussveranstaltung und Fachtagung des AirQuality-Projektes; Präsentation der Ergebnisse und fachlicher Austausch weiterer mFUND geförderter Projekte im Bereich Luftqualitätsdatenerfassung.
- Blogbeitrag von Geotab: "AirQuality-Projekt fördert die Verbesserung der Luftqualität in deutschen Städten", veröffentlicht am 4. Oktober 2021 unter <https://www.geotab.com/de/blog/air-quality-projekt/>
- mFUND-Konferenz: Beitrag in dem Fachforum "Datenlösungen für erweiterte Emissionserfassungen und verkehrspolitische Handlungskonzepte" am 19.10.2021
- Fachkolloquium "Nutzen & Anwendungsfälle von Echtzeitdaten in der Mobilität" am 6. Oktober 2021: Online-Veranstaltung des mFUND-geförderten Projektes NV-ProVi
- Pressemitteilung zum Projektabschluss: Veröffentlicht am 26. Oktober 2021 unter <https://www.fir.rwth-aachen.de/newsroom/pressemitteilungen/detail/news/erhebung-mobiler-luftqualitaetsdaten-in-echtzeit/>
<https://www.geotab.com/de/presse/fir-und-geotab-airquality-projekt/>
- Bereitstellung von Daten über die [mCLOUD](#)

Geplante Veröffentlichungen:

- FIR-Fachzeitschrift UdZ: Veröffentlichung eines Artikels in der Ausgabe 2-2021.
- Mind. eine weitere Veröffentlichung auf dem Geotab-Blog zur Darstellung der Ergebnisse

Literaturverzeichnis

- AACHENER STRAßENBAHN UND ENERGIEVERSORGUNGS-AKTIENGESELLSCHAFT. (2021, April). Geschäftsbericht 2020, S.14. Online unter: https://www.aseag.de/fileadmin/aseag_media/documents/Geschaeftsberichte/Geschaeftsbericht_2020.pdf, letzter Zugriff: 10. November 2021
- AIR MATTERS. (o.D.). Online unter: <https://air-matters.com/index.html>, letzter Zugriff: 08. November 2021.
- ABOUT THE WORLD AIR QUALITY INDEX PROJECT. (o.D.). Online unter: <https://aqicn.org/contact/>, letzter Zugriff: 08. November 2021.
- BAARS, CHRISTIAN. (2020, September). Grenzwerte für Luftverschmutzung: WHO verschärft Empfehlungen massiv. 22. September 2021. Online unter: <https://www.tagesschau.de/investigativ/ndr/who-luftverschmutzung-111.html>, letzter Zugriff: 08. November 2021.
- BREEZE TECHNOLOGIES. (o.D.). Online unter: <https://www.breeze-technologies.de/solutions/urban-air-quality/>, letzter Zugriff: 08 November 2021.
- CRASK, Oliver. (o.D.). Particulate: Air Quality Monitoring for Everyone. Online unter: <https://www.hackster.io/OxygenLithium/particulate-air-quality-monitoring-for-everyone-3caef2>, letzter Zugriff: 08. November 2021.
- CRESSIE, NOEL. (1988). Spatial prediction and ordinary kriging, in: Mathematical Geology, Bd. 20, Nr. 4, S. 405-421, [online] doi:10.1007/bf00892986
- DEUTSCHE UMWELTHILFE. (2020, Juli). So haben unsere Klagen die Luft in Deutschland sauberer gemacht. Online unter: <https://www.duh.de/aktuell/nachrichten/aktuelle-meldung/so-haben-unsere-klagen-die-luft-in-deutschland-sauberer-gemacht/>, letzter Zugriff: 09.08.2021.
- DOUGLAS, FELICIA; ELIZABETH FONSECA; CATHERINE ITTNER (o.D.). The Breathe London Blueprint: How cities can use hyperlocal air pollution monitoring to support their clean air goal, EDF Global Clean Air Initiative 2021. Online unter: <https://www.globalcleanair.org/blueprint>, letzter Zugriff: 10.08.2021.
- DÜSSELDORF: NÄHE TRIFFT FREIHEIT. (o.D.) Umweltpuren in Düsseldorf. Online unter: <https://www.duesseldorf.de/verkehrsmanagement/verkehrswende-jetzt/umweltpuren.html>, letzter Zugriff: 08. November 2021.
- ENVIRONMENTAL DEFENSE FUND. (2021, Februar). The Breathe London Blueprint: How cities can use hyperlocal air pollution monitoring to support their clean air goals. Online unter: https://www.globalcleanair.org/files/2021/02/EDF-Europe-BreatheLondon_Blueprint-guide.pdf, letzter Zugriff: 23.09.2021.
- KEMPENEERS, Koen. (2016, März). IoT@School: An IoT Implementation for Monitoring Air Quality. Online unter: <https://www.hackster.io/KKE/iot-school-an-iot-implementation-for-monitoring-air-quality-78d6d3>, letzter Zugriff: 08. November 2021.
- LANUV. (o.D.). Messorte der Luftqualitätsüberwachung in NRW. Online unter: <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/luft/immissionen/messorte-und-werte/>, letzter Zugriff: 08. November 2021.
- LUFTDATEN.INFO. (o.D.). Online unter: <https://luftdaten.info/>, letzter Zugriff: 08. November 2021.

- NOWLAN, AILEEN. (2018, September). Future fleets: how clean air innovations are driving smarter, healthier cities. Online unter: <https://business.edf.org/insights/future-fleets/>, letzter Zugriff: 09.08.2021.
- OSTERWALDER ET AL. (2014). Value Proposition Design: How to Create Products and Services Customers Want (Strategyzer). New York.
- PAULAT, VOLKER. (2021, März) Umweltspur-Alternativen funktionieren reibungslos: Umweltsensitive Signalsteuerung an drei Ampelanlagen in Betrieb/Amt für Verkehrsmanagement zieht positive erste Bilanz. Online unter: <https://www.duesseldorf.de/medienportal/pressediens-einzelansicht/pld/umweltspur-alternativen-funktionieren-reibungslos.html>, letzter Zugriff: 08. November 2021.
- PUDERER, James. (2017, Oktober). Distributed Air Quality Monitoring (Using Taxis!). Online unter: <https://www.hackster.io/james-puderer/distributed-air-quality-monitoring-using-taxis-69647e>. letzter Zugriff: 08. November 2021.
- PURPLEAIR. (o.D.). Online unter: <https://map.purpleair.com/1/mAQI/a10/p604800/cC0#4.02/46.63/22.6>, letzter Zugriff: 08. November 2021.
- SENSOR.COMMUNITY. (o.D.). Online unter: <https://sensor.community/en/>, letzter Zugriff: 08. November 2021.
- STRATEGYZER. Value Proposition Design. (o.D.) Online unter: <https://www.strategyzer.com/books/value-proposition-design>, letzter Zugriff: 08. November 2021.
- TELINA. (2018, November). Mobile Fine Dust (PM10 & PM2.5) and NO2 Meter. Online unter: https://www.hackster.io/Telina/mobile-fine-dust-pm10-pm2-5-and-no2-meter-5d011b?utm_source=Hackster.io+newsletter&utm_campaign=651dbd7379-EMAIL_CAMPAIGN_2017_07_26_COPY_01&utm_medium=email&utm_term=0_6ff81e3e5b-651dbd7379-142798077&mc_cid=651dbd7379&mc_eid=c0add9fa9e, letzter Zugriff: 08 November 2021.
- UMWELT BUNDESAMT. (o.D.). Online unter: Aktuelle Luftdaten, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftdaten>, letzter Zugriff: 08. November 2021.
- WELTGESUNDHEITSORGANISATION: REGIONALBÜRO FÜR EUROPA. (2021, September). Neue globale Luftgüteleitlinien der WHO sollen Millionen von Menschenleben vor Luftverschmutzung retten. Online unter: <https://www.euro.who.int/de/media-centre/sections/press-releases/2021/new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>, letzter Zugriff: 08. November 2021.
- WHO. (2021). WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Online unter: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>, letzter Zugriff: 08. November 2021.

Anhang

A1: Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

- AIR QUALITY SENSOR PERFORMANCE EVALUATION CENTER (AQ-SPEC). (o.D.). Field Evaluations. Online unter: <http://www.aqmd.gov/qa-spec/evaluations/field>, letzter Zugriff: 03.08.2021.
- BRAATEN, JUSTIN. (2020, April). Monitoring air quality with S5P TROPOMI data. Online unter: <https://medium.com/google-earth/monitoring-air-quality-with-s5p-tropomi-data-4f6b0aeb1c0>, letzter Zugriff: 03.08.2021.
- BREATHE LONDON TECHNICAL REPORT. (2021, Januar). Pilot Phase (2018 – 2020). Online unter: <https://www.globalcleanair.org/files/2021/05/BL-Pilot-Final-Technical-Report.pdf>
- BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ. (2010, August 02). Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen (39. BImSchV). Online unter: https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_39/39._BImSchV.pdf
- CRASK, Oliver. (2018, Juni). Particulate: Air Quality Monitoring for Everyone. Online unter: <https://www.hackster.io/OxygenLithium/particulate-air-quality-monitoring-for-everyone-3caef2>, letzter Zugriff: 08. November 2021.
- EUROPEAN COMMISSION (EC). (o.D.). INSPIRE Geoportal. Online unter: <https://inspire-geoportal.ec.europa.eu/>
- ENVIRONMENTAL DEFENSE FUND (EDF). (o.D.). The Breathe London Blueprint: How cities can use hyperlocal air pollution monitoring to support their clean air goals. Online unter: https://www.globalcleanair.org/files/2021/02/EDF-Europe-BreatheLondon_Blueprint-guide.pdf
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). (o.D.). Discover Map Services. Online unter: <https://discomap.eea.europa.eu/Index/>, letzter Zugriff: 03.08.2021
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). (o.D.). Download of air quality data. Online unter: <https://discomap.eea.europa.eu/map/fme/AirQualityExport.htm>, letzter Zugriff: 03.08.2021
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). (o.D.). Assessing air quality through citizen science. Online unter: <https://www.eea.europa.eu/publications/assessing-air-quality-through-citizen-science>, letzter Zugriff: 03.08.2021.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). (2011, November 15). EEA Air Quality animation. Online unter: <https://www.youtube.com/watch?v=IPXlvaXI0xg&t=4s>
- KEMPENEERS, Koen. (2016, März). IoT@School: An IoT Implementation for Monitoring Air Quality. Online unter: <https://www.hackster.io/KKE/iot-school-an-iot-implementation-for-monitoring-air-quality-78d6d3>, letzter Zugriff: 08. November 2021.

- LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN. (o.D.). Messorte der Luftqualitätsüberwachung in NRW. Online unter: <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/luft/immissionen/messorte-und-werte/>, letzter Zugriff: 03.08.2021.
- MOORE, REBECCA. (2019, Oktober 10). Fighting climate change with new data. Online unter: <https://www.blog.google/outreach-initiatives/sustainability/fighting-climate-change-new-data/>, letzter Zugriff: 03.08.2021.
- MOVABLE TYPE SCRIPTS. (o.D.). Geohashes. Online unter: <https://www.movable-type.co.uk/scripts/geohash.html>, letzter Zugriff: 03.08.2021.
- NOWLAN, AILEEN. (2018, September). Future fleets: how clean air innovations are driving smarter, healthier cities. Online unter: <https://business.edf.org/insights/future-fleets/>, letzter Zugriff 03.08.2021.
- PUDERER, James. (2017, Oktober). Distributed Air Quality Monitoring (Using Taxis!). Online unter: <https://www.hackster.io/james-puderer/distributed-air-quality-monitoring-using-taxis-69647e>. letzter Zugriff: 08. November 2021.
- TELINA. (2018, November). Mobile Fine Dust (PM10 & PM2.5) and NO2 Meter. Online unter: https://www.hackster.io/Telina/mobile-fine-dust-pm10-pm2-5-and-no2-meter-5d011b?utm_source=Hackster.io+newsletter&utm_campaign=651dbd7379-EMAIL_CAMPAIGN_2017_07_26_COPY_01&utm_medium=email&utm_term=0_6ff81e3e5b-651dbd7379-142798077&mc_cid=651dbd7379&mc_eid=c0add9fa9e, letzter Zugriff: 08 November 2021.
- TUXEN-BETTMAN, KARIN. (2019, Juni). Working to map the air everywhere and help. Online unter: <https://www.blog.google/products/maps/working-map-air-everywhere-and-help-beatairpollution/>
- TUXEN-BETTMAN, KARIN. (2019, Juni 5). Working to map the air everywhere and help. Online unter: <https://www.blog.google/products/maps/working-map-air-everywhere-and-help-beatairpollution/>, letzter Zugriff: 03.08.2021.
- TUXEN-BETTMAN, KARIN. (2018, Oktober 9). A breath of fresh air: Measuring air quality in Copenhagen. Online unter: <https://www.blog.google/around-the-globe/google-europe/breath-fresh-air-measuring-air-quality-copenhagen/>, letzter Zugriff:03.08.2021.
- TUXEN-BETTMAN, KARIN. (2019, Mai 16). Street View cars measure Amsterdam's air quality. Online unter: <https://www.blog.google/around-the-globe/google-europe/street-view-cars-measure-amsterdams-air-quality/>, letzter Zugriff: 03.08.2021.
- TUXEN-BETTMAN, KARIN. (2018, September 13). Air View is ready to expand to more places around the globe. Online unter: <https://www.blog.google/products/maps/air-view-ready-expand-more-places-around-globe/>, letzter Zugriff: 03.08.2021.
- UMWELT BUNDESAMT (UBA). (o.D.). Luft. Online unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft>, letzter Zugriff: 03.08.2021.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). (2020, Oktober 28). Air Quality System (AQS). Online unter: <https://www.epa.gov/aqs>, letzter Zugriff: 03.08.2021.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). (2021, Juni). AQI Breakpoints. Online unter: https://aqs.epa.gov/aqsweb/documents/codetables/aqi_breakpoints.html, letzter Zugriff: 03.08.2021.

WORLD AIR QUALITY INDEX PROJECT. (o.D.). Aachen Wilhelmstraße. Air Pollution: Real-time Air Quality Index (AQI). Online unter: <http://aqicn.org/city/germany/nrw/aachen-wilhelmstrasse/>, letzter Zugriff: 03.08.2021.

WORLD AIR QUALITY INDEX PROJECT. (o.D.). The Plantower PMS5003 and PMS7003 Air Quality Sensor experiment. Online unter: <https://aqicn.org/sensor/pms5003-7003/>, letzter Zugriff: 03.08.2021.

A2: Testplan und Ergebnisse des AirQuality-Projekts

Ziel des Projektes „AirQuality“

Ziel des Projektes „AirQuality“ ist der Aufbau einer Lösung zur feinräumigen Luftqualitätsmessung innerhalb von Städten unter Verwendung einer innerstädtischen Fahrzeugflotte, mit deren Hilfe eine standortgenaue Darstellung von Luftqualitätsdaten auf einer digitalen Plattform angezeigt werden kann. Die Erhebung von Luftqualitätsdaten soll in einer bisher nicht vorhandenen Granularität durch Nutzung bereits bestehender Sensorik in mobilen Flotten erfolgen. Zudem soll ein User Interface zur Analyse und Visualisierung der Daten für schadstoffreduzierende Maßnahmen zur Verfügung gestellt werden.

Einleitung

Im Rahmen des AirQuality-Projekts sollen mit mobilen Sensoren Daten über die Luftqualität gesammelt werden, welche es ermöglichen feingranulare Luftqualitätskarten für eine Stadt zu erstellen. Dies soll bis Sommer 2021 zunächst für die Stadt Aachen und anschließend auch für die Städte Halle (Saale) und Gelsenkirchen umgesetzt zu werden. Ziel des Projektes ist es, Transparenz hinsichtlich der tatsächlichen lokalen Luftqualität zu schaffen. Hierdurch soll Städten mit Luftqualitätsproblemen die Möglichkeit gegeben werden, besonders belastete Bereiche zu identifizieren und anschließend ausgeübte Maßnahmen zu Qualitätsverbesserung zu validieren. Dazu wird ein kostengünstiges Tool zur feinräumigen Erhebung, Visualisierung und Nutzung von Luftqualitätsdaten entwickelt, welches die bereits existierenden stationären Messstationen durch mobile Sensoreinheiten ergänzt. Bereits auf dem Markt befindliche Telematik- und Kommunikationsmodule zum Flottenmanagement werden um kostengünstige und kompakte Sensoreinheiten ergänzt und auf aktiven Fahrzeugflotten (z.B. ÖPNV, Lieferdienste, städtische Betriebe) installiert. Sie bilden so ein mobiles IoT-Sensor Netzwerk, welches ein feingranulares Netz von Datenpunkten schafft und somit eine detaillierte Betrachtung der Luftqualität in Echtzeit zulässt. Es wird eine Granularität von etwa 150 m x 150 m angestrebt.

Folgende begleitende Forschungsfragen und Herausforderungen ergeben sich, welche in dem nachfolgenden Testplan beleuchtet und nach Möglichkeit beantwortet werden sollen:

1. Wie viel % des Aachener Stadtgebietes wird bereits mit 15 Bussen abgedeckt?
2. Wie viele Busse werden (noch) benötigt um das Stadtgebiet ausreichend abzudecken?
(Ziel: tägliche Stadtgebietsabdeckung von rund 65%)
3. Lässt sich zuverlässig kalkulieren, wie viele Fahrzeuge in anderen Städten für eine ausreichend flächendeckende Datensammlung benötigt werden?

4. Wie können weitere Fahrzeugtypen mit Sensoren ausgestattet werden (Platzierung, Elektronik) und wie ist der Einfluss der Einbauposition auf die Messwerte?
5. Wie wirkt sich die Fahrzeuggeschwindigkeit auf die Messwerte aus?
6. Wie groß ist die Abweichung der Messwerte zwischen mobilen und stationären Sensoren?
7. Wie wirken sich Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Luftqualität bzw. die Messwerte aus?
8. Welche Use Cases im Bereich Smart City (z.B. Stadtplanung, Verkehrssteuerung etc.) lassen sich mit mobiler Luftqualitätserfassung angehen?

Frage 1: Welcher Anteil des Aachener Stadtgebietes wird bereits mit 15 Bussen abgedeckt?

Definition der Flächen

Zunächst wird eine geographische Einordnung des Untersuchungsgebiets des Aachener Stadtgebietes vorgenommen. Im Folgenden wird die Innenstadt als das Gebiet innerhalb des sogenannten inneren Rings definiert, in dessen Zentrum der Aachener Dom steht und in großen Teilen der Position der ehemaligen Stadtmauer der Stadt entspricht (s. Abbildung 10).

Innerer Ring

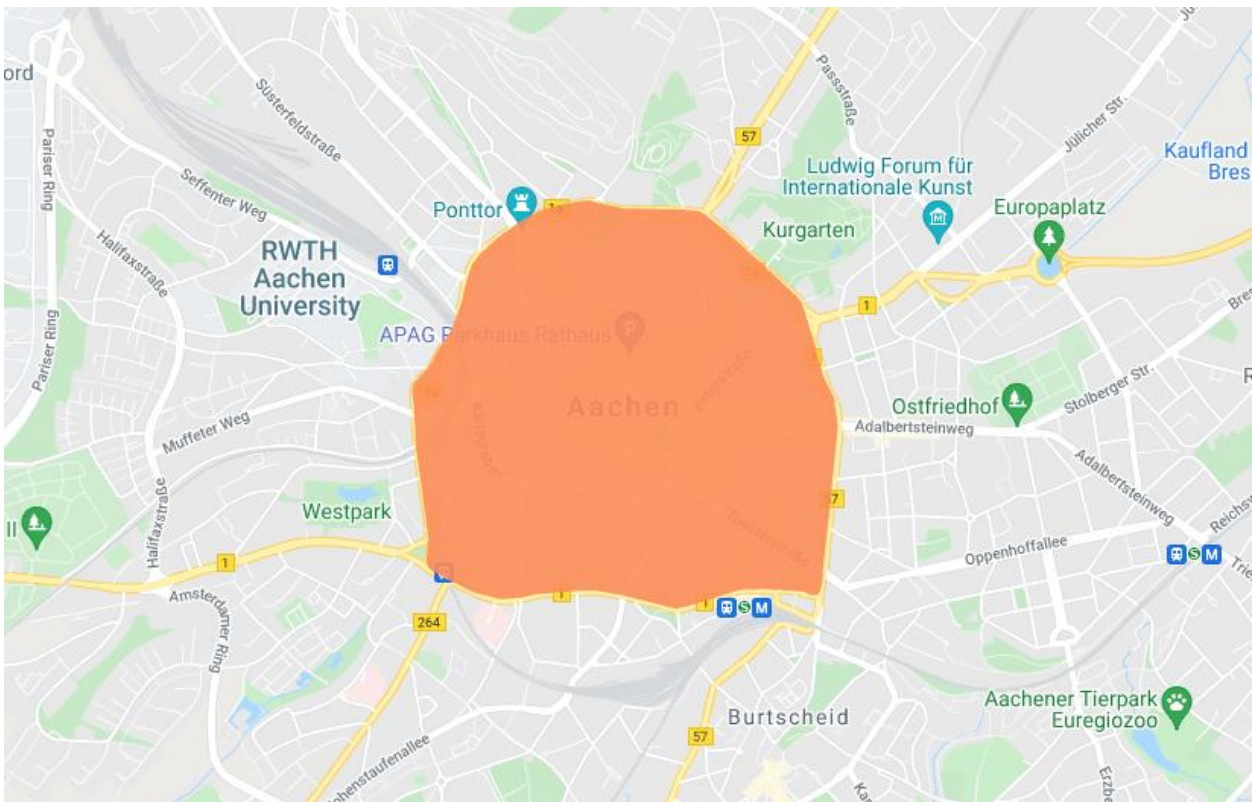


Abbildung 10: Definition des inneren Rings von Aachen

Dieses Gebiet umfasst eine Fläche von gut 2,2 Quadratkilometern. Zur Analyse werden sogenannte Geohashes hinzugezogen, welche die Welt in Rechtecke zerlegen und zur Spatial-Datenanalyse angewendet werden können. Ein "Geohash" ist ein öffentlich verfügbares Codierungssystem, welches eine rechteckige Fläche bestimmt und global eindeutig kodiert ist (via alphanumerischer Zeichenfolge). Die Länge der Strings bestimmt die Genauigkeit der Geohashes (Werte von 1-12). In diesem Projekt werden Geohashes der Länge 7 verwendet, dadurch werden Rechtecke der Größe $\leq 153\text{m} \times 153\text{m}$ erzeugt. Bei einer Geohash-Präzision von 7 wird Aachen in Rechtecke mit einer Grundfläche von etwa $153\text{ m} \times 97\text{ m}$ (Höhe x Breite)

eingeteilt (s. Abbildung 11). Insgesamt befinden sich in Aachen somit **126 Geohashes**, welche im Folgenden für die Analyse verwendet werden können.

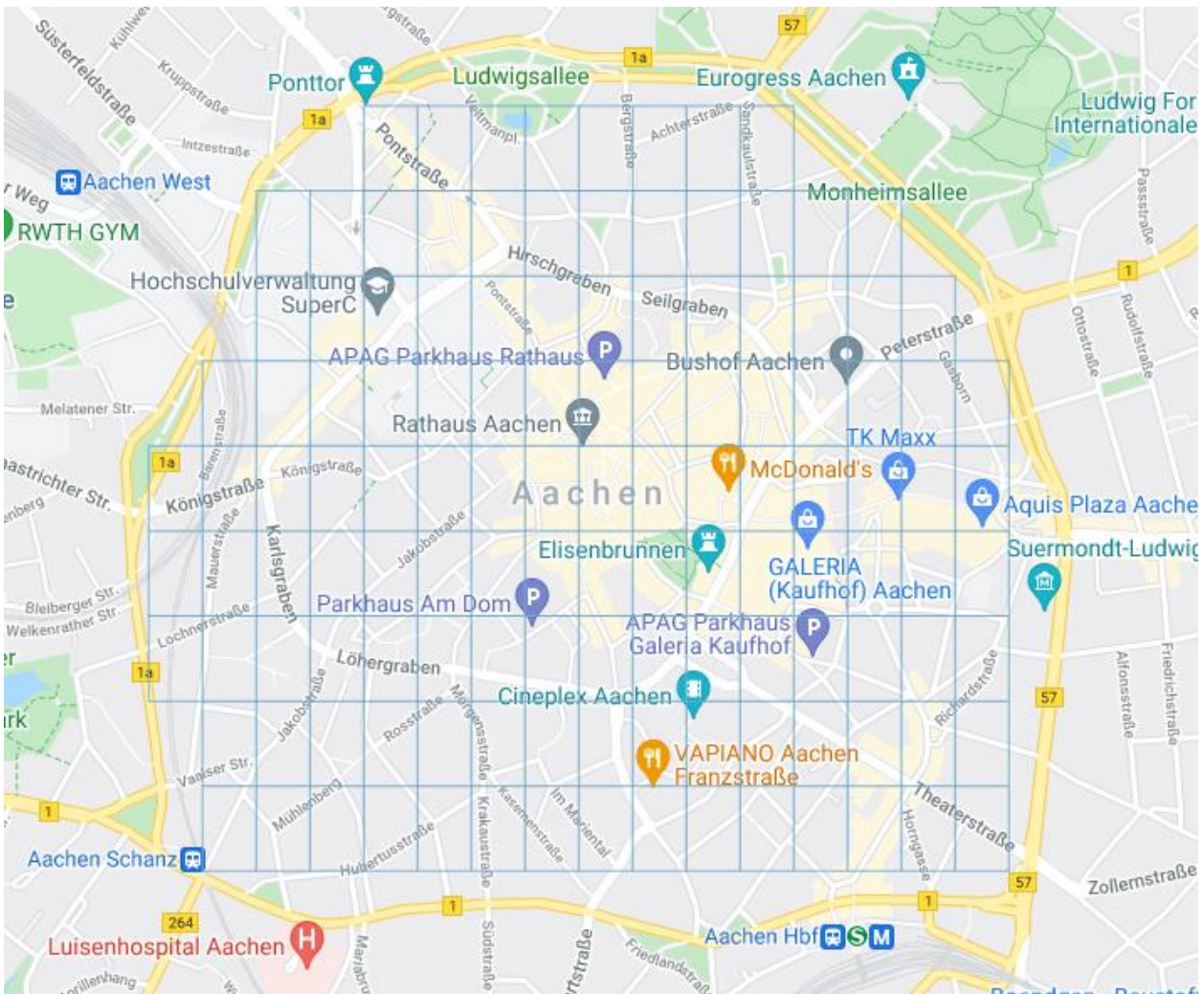


Abbildung 11: Eingeschlossene Geohash-7-Parzellen im inneren Ring

Äußerer Ring

Des Weiteren soll auch das Gebiet innerhalb des äußeren Rings der Stadt untersucht werden, welches im Großteil in Aachen-Aachen liegt und die Peripherie der Stadt mit Verbindungen zu den Bundesstraßen und den anliegenden Autobahnen darstellt.

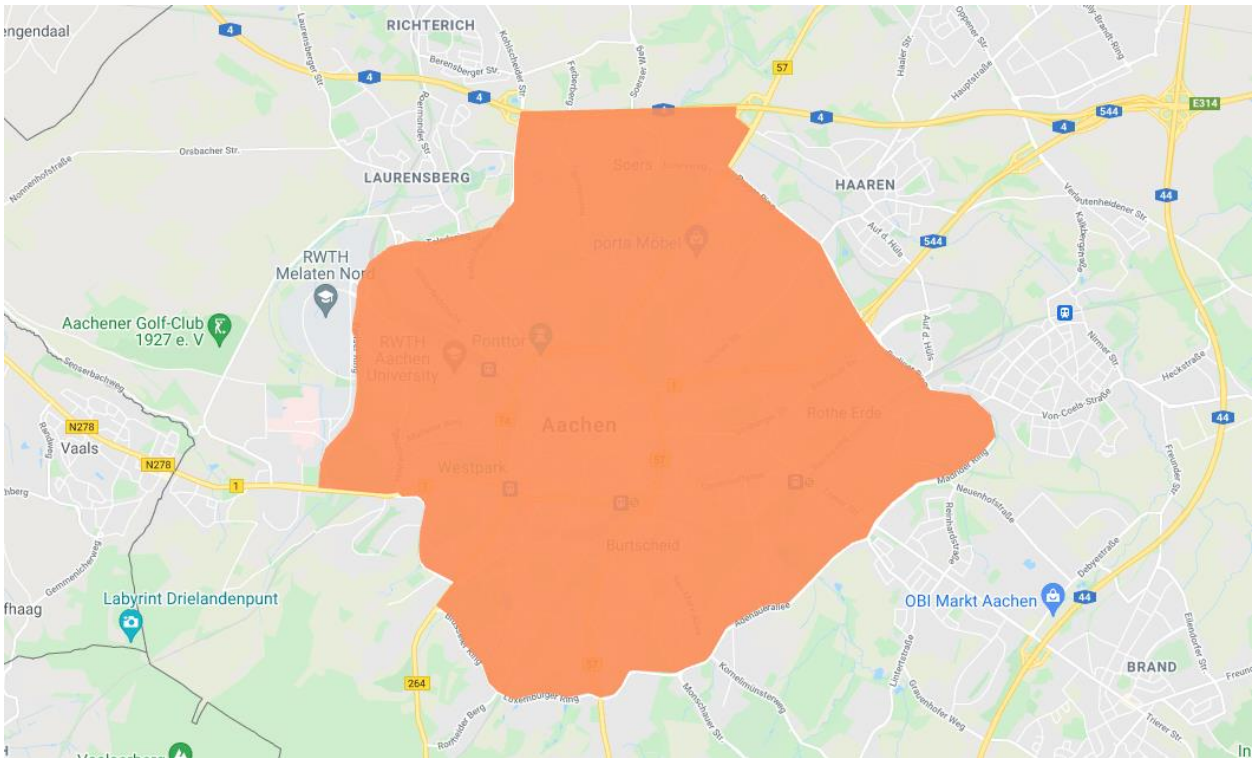


Abbildung 12: Definition des äußeren Rings von Aachen

Dieses Gebiet umfasst eine Fläche von rund 25 Quadratkilometern. Analog zu dem Gebiet des inneren Rings wird auch das Gebiet des äußeren Rings in Geohashes mit der Präzision 7 eingeteilt. Insgesamt befinden sich **1592 Geohashes** in dem eingeschlossenen Gebiet.

Erste Reduktion aufgrund von Flächennutzung und Straßenführung

Allerdings befinden sich auch Parks, Grünflächen und Wälder, Stadien, Plätze und Freiflächen sowie Bahnanlagen, Industriegebiete und Straßen mit beschränkter Zufahrt in dem betrachteten Gebiet. Mittels einer Datenanalyse in OpenStreetMap wurden **448 Geohashes im Gebiet des äußeren Rings** bestimmt, auf welchen sich keine öffentlich befahrbaren Straßen befinden. Davon liegen **10 Geohashes innerhalb des inneren Rings**, beispielsweise um die Kernstadt im Bereich des Aachener Doms sowie der Hochschulverwaltung der RWTH Aachen und der Bahnstrecke zwischen Aachen Schanz und Aachen West. Im Folgenden sind die Straßen in blau dargestellt und die errechneten Geohashes ohne Straßen in orange.

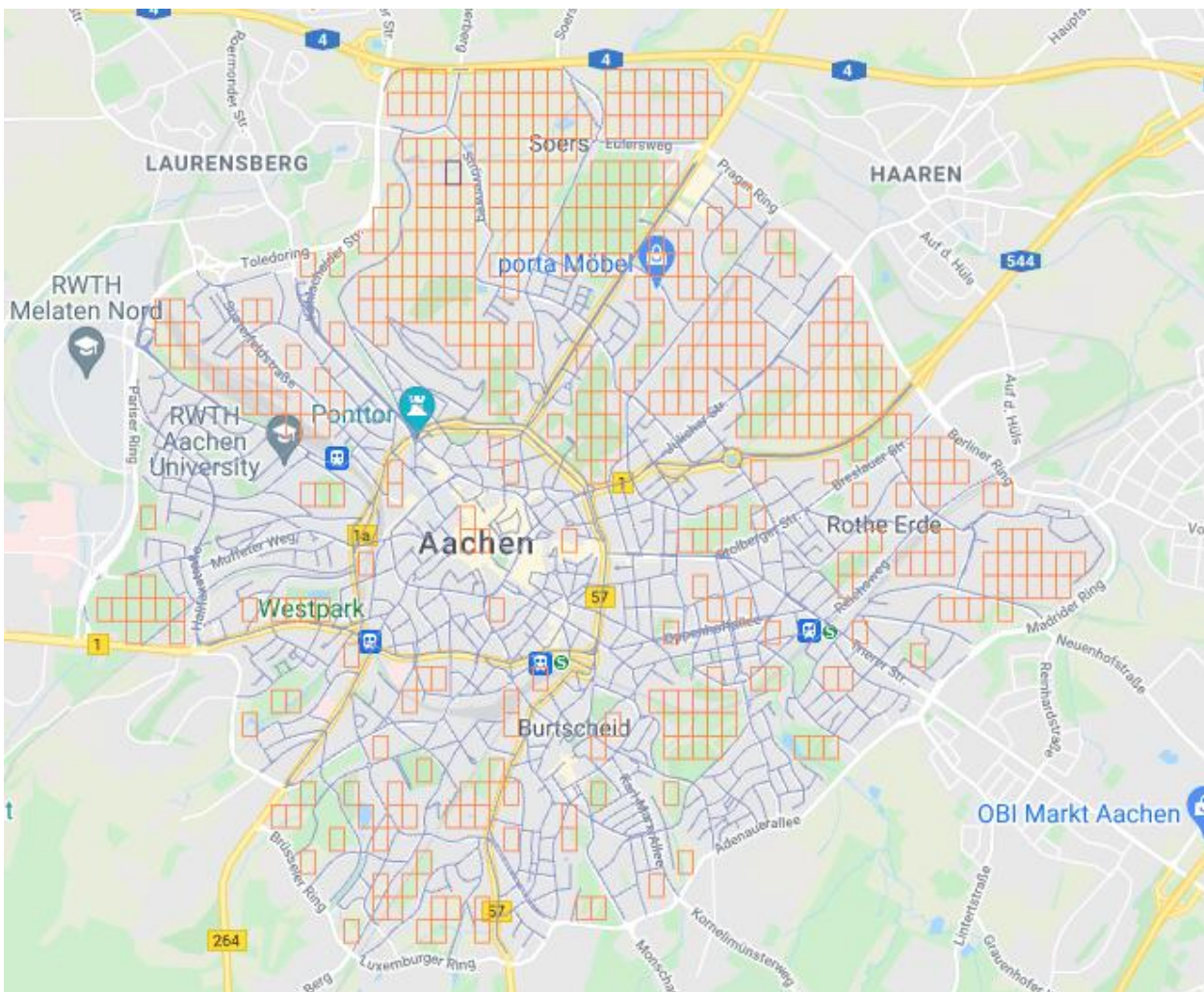


Abbildung 13: Erste Reduktion der Geohash-7-Parzellen um nicht befahrbare Straßen (orange markiert)

Somit reduziert sich die Gesamtzahl **von 126 auf 116** erreichbare Geohashes innerhalb des inneren Rings sowie insgesamt **von 1592 auf 1144** Geohashes innerhalb des äußeren Rings.

Zweite Reduktion aufgrund der Linienführung der ASEAG-Busse

Des Weiteren soll die Linienführung der Busse der ASEAG bei der Analyse berücksichtigt werden. Der öffentliche Nahverkehr wird so geplant, dass die Wohngebiete durch größere Straßen erschlossen sind und kleinere Straßen von den Bussen nicht befahren werden. Hierzu wurden die seit der operativen Projektinitiierung mit Inbetriebnahme der ersten Prototypen im Februar 2019 befahrenen Straßen analysiert (Stand 28.09.2021) und eine neue Grundgesamtheit definiert. In Abbildung 14 sind in grau die GPS-Positionsdaten der Gesamtflotte aus diesem Untersuchungszeitraum dargestellt, in blau im Hintergrund die entsprechenden Geohashes (Präzision 7).

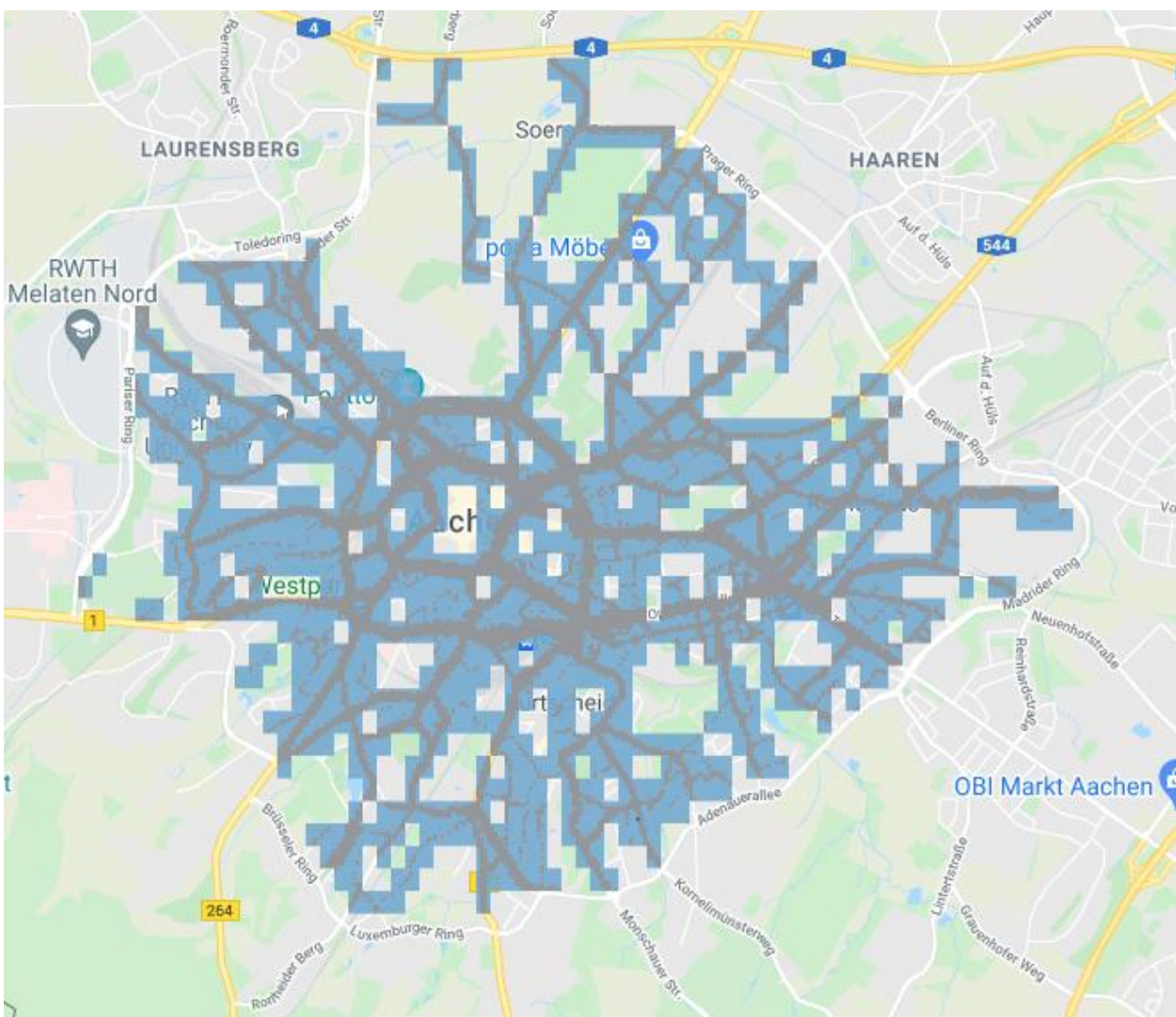


Abbildung 14: Zweite Reduktion der Geohash-7-Parzellen auf von der ASEAG-Flotte befahrbare Bereiche (GPS-Bereiche grau, Geohash-7 blau markiert)

Innerhalb des äußeren Rings reduziert sich die Anzahl der möglichen Geohashes **von 1144 auf 953**, im Bereich des inneren Rings wird die Anzahl weiterhin **von 116 auf 106 Geohashes** verringert.

Abdeckung der definierten Gebiete im August 2021

Zunächst wird die generelle Abdeckung der gesamten ausgerüsteten Busflotte im Monat August 2021 in ganz Aachen geprüft. Wird ein Geohash in dem gesamten Zeitraum von nur einem Bus durchfahren, wird der Geohash in hellgelb markiert, wird ein Geohash von der höchstmöglichen Anzahl an Bussen durchfahren, so wird er dunkelrot dargestellt.

Innerer Ring

Innerhalb des inneren Ringes ergibt sich die folgende Abdeckung:

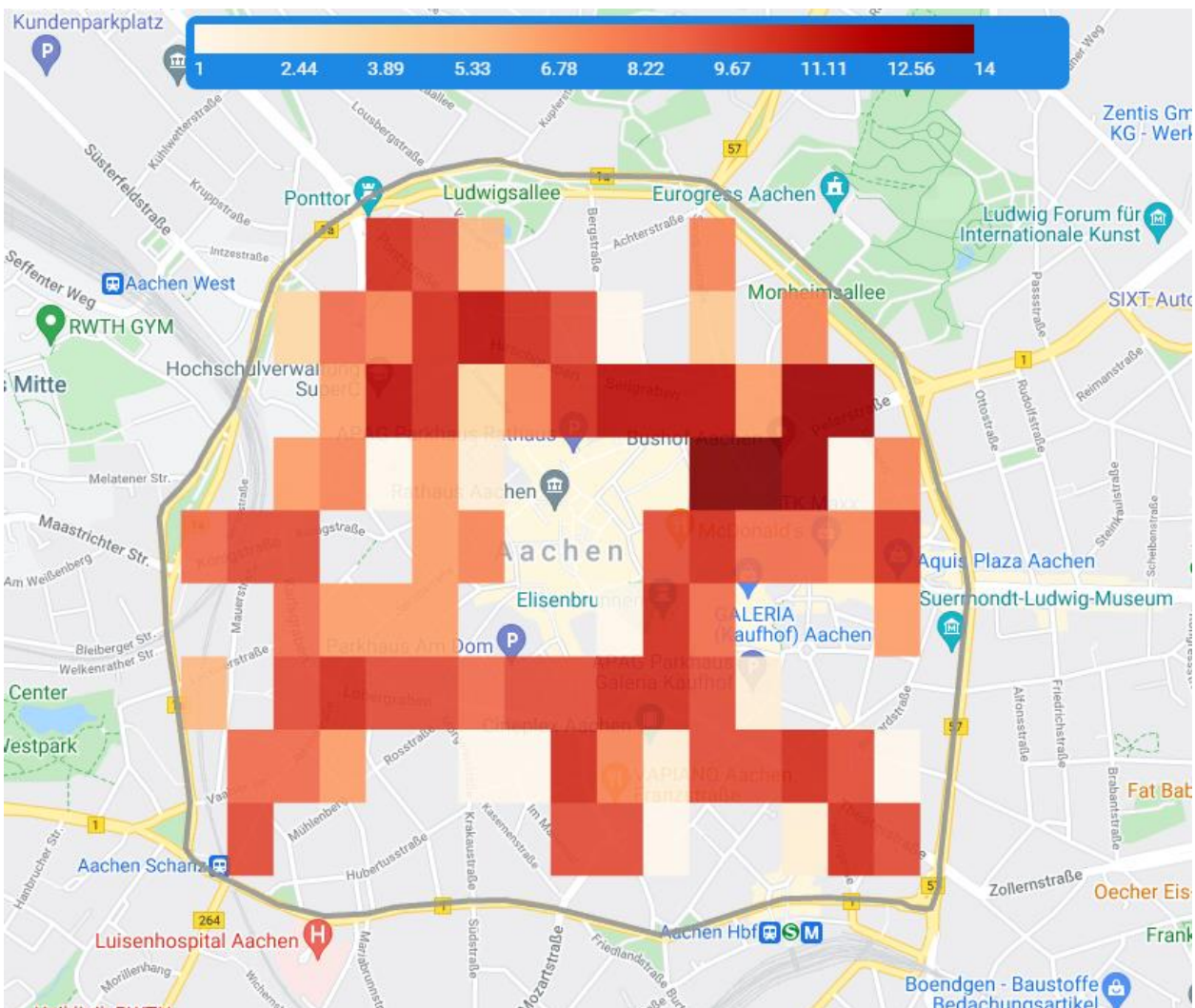


Abbildung 15: Anzahl der Busse, die im August 2021 pro Geohash im inneren Ring Daten erfasst haben

Insgesamt 87 der 126 Geohashes des inneren Rings, oder **69,05% der Geohashes**, wurden in dem betrachteten Zeitraum von Bussen der ASEAG befahren. Berücksichtigt man nun die oben erläuterten Reduktionsschritte der Grundgesamtheit, ergibt sich eine Gesamtabdeckung von **75,00%** der Geohashes für den Schritt der **ersten Reduktion**, sowie eine **Abdeckung von 82,08%** für die **zweite Reduktion**.

Es lässt sich zudem festhalten, dass ein Großteil der Hauptstraßen durch eine hohe Anzahl von mit AirQuality-Sensoren ausgerüsteten Bussen der ASEAG abgedeckt wird. Allerdings gibt es auch kleinere Straßen, welche durch wenige Busse oder gar nicht befahren werden. Weniger überraschend ist, dass im Bereich des Aachener Bushofes die dunkelste Einfärbung anzutreffen ist, da dieser den Knotenpunkt des Busverkehrs in der Stadt darstellt. Hier sind im betrachteten Zeitraum insgesamt 14 unterschiedlichen Busse gefahren.

Äußerer Ring

Betrachtet man nun das gesamte Stadtgebiet innerhalb des äußeren Rings, so ergibt sich die folgende Abdeckung:

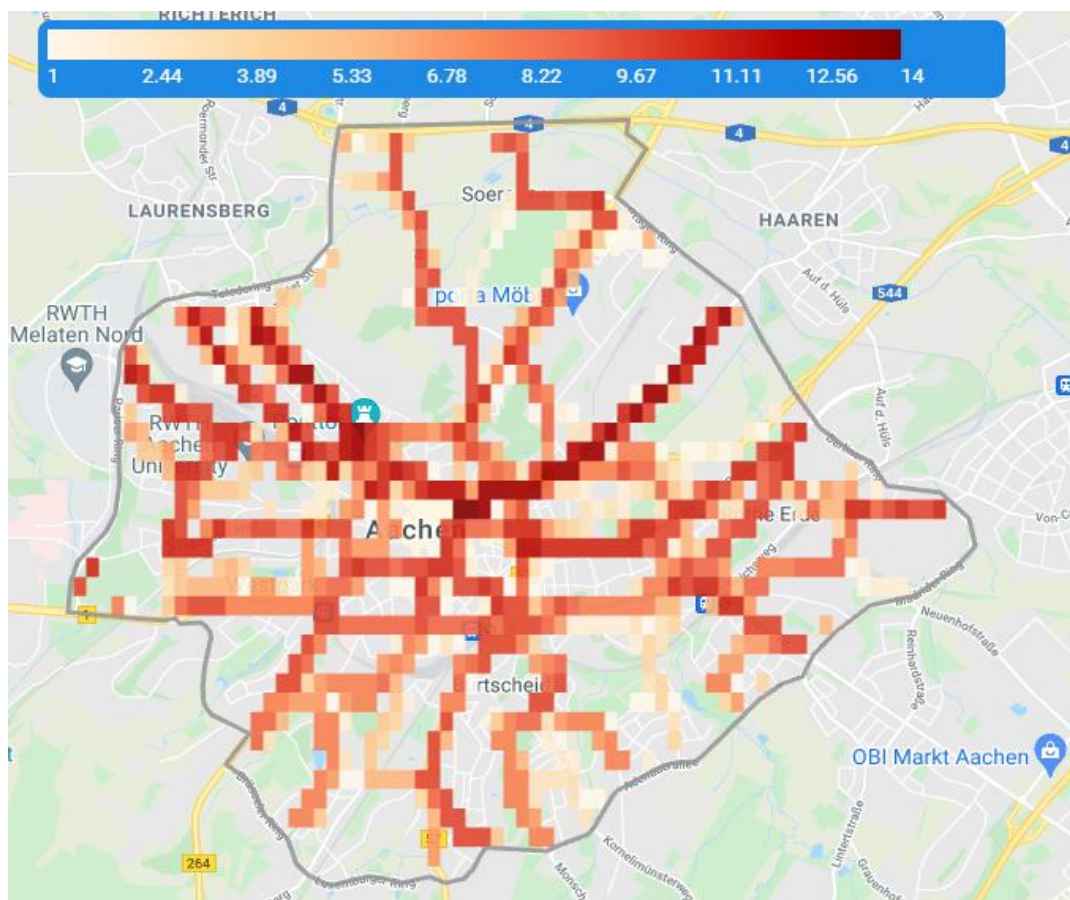


Abbildung 16: Anzahl der Busse, die im August 2021 pro Geohash im äußeren Ring Daten erfasst haben

Insgesamt wurden im Betrachtungszeitraum 769 der 1592 Geohashes von der ausgerüsteten Busflotte befahren. Dies entspricht einer **Flächenabdeckung von 48,30%**. Wenn man wie oben nur Straßen als Grundgesamtheit (1144 Geohashes) nimmt, steigt die Abdeckung im Gesamtzeitraum auf **67,22%**. Wird zusätzlich die Linienführung der ASEAG berücksichtigt (953 Geohashes), steigt die praktische Abdeckung auf **80,69%**.

Die verschiedenen Einfärbungen der Geohashes lassen vermuten, dass die Busse auf unterschiedlichen Linien gefahren werden, wobei jedoch viele der Hauptverkehrsadern von einem Großteil der Busse befahren werden (dunkelorange bis rote Einfärbung). Auch hier zeigt sich, dass kleinere Straßen und Peripherie anscheinend nur von bestimmten Bussen bedient werden (hellgelbe Einfärbung).

Die ASEAG gibt im Geschäftsbericht von 2020 an, insgesamt 501 Busse zu betreiben, aus denen lediglich 15 mit der von Geotab entwickelten Sensorik und Telematik ausgestattet wurden (ASEAG 2021). An dieser Stelle bietet es sich an, eine detaillierte Untersuchung der Zuweisung der einzelnen Busse zu Linienzügen durchzuführen, was jedoch den Umfang dieses Berichtes übersteigt.

Die errechneten Abdeckungen sollen im Folgenden noch zeitlich eingeordnet werden: Welcher Anteil des Aachener Stadtgebiets kann durch die Testflotte gleichzeitig, d.h. an einem einzigen Tag oder sogar pro Stunde abgedeckt werden?

Anzahl der Tage, die jeder Geohash von mindestens einem Bus befahren wurde

Neben der Anzahl der Busse, die in dem betrachteten Monat die Teile der Stadt befahren haben, ist außerdem von Relevanz, an wie vielen Tagen ein Geohash von mindestens einem Bus der Flotte befahren wurde und damit Messergebnisse vorliegen. Für ein aussagekräftiges Ergebnis wird empfohlen, je nach Möglichkeit einmal täglich eine Abdeckung in den jeweiligen Geohashes zu erhalten.

Im Folgenden wird in einer weiß-blauen Farbskala dargestellt, an wie vielen Tagen im betrachteten Zeitraum ein Geohash von Bussen befahren wurde. Wurde ein Geohash nur an einem Tag von Bussen befahren, wird dies mit einer weißen Einfärbung dargestellt, wurde er jeden Tag des Untersuchungsmonats befahren (31 Tage), so wird dies mit einer dunkelblauen Einfärbung angezeigt.

Innerer Ring

Zunächst soll das Stadtzentrum Aachens innerhalb des inneren Rings untersucht werden.

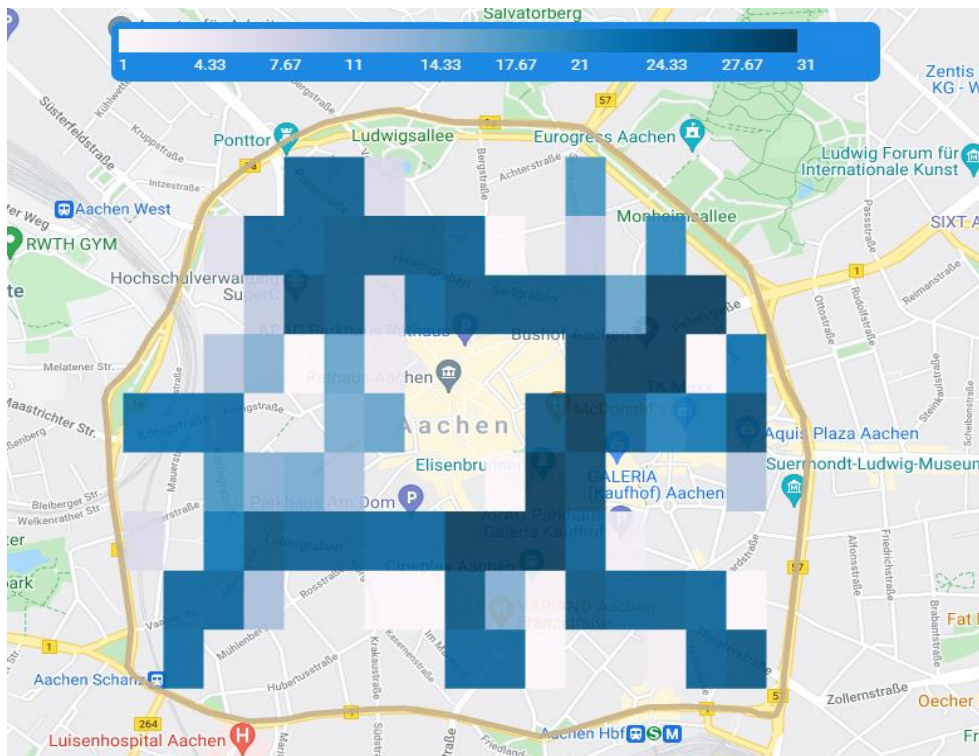


Abbildung 17: Anzahl der Tage, an denen im August 2021 pro Geohash im inneren Ring Daten erfasst wurden

Es fällt auf, dass für einen Großteil der befahrenen Teile der Stadt eine nahezu tägliche Abdeckung der Geohashes vorliegt; Insbesondere im Umfeld des Aachener Bushofes und des Grabens um die Innenstadt ist eine hohe Abdeckung möglich.

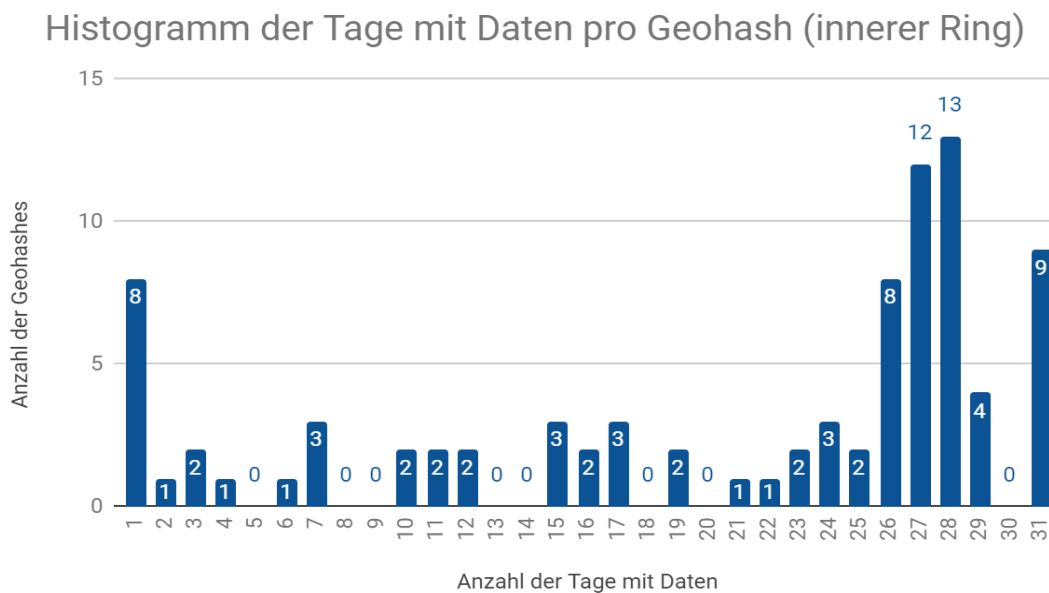


Abbildung 18: Histogramm der Häufigkeit der Geohashes innerhalb des inneren Rings, aufgeteilt nach Tagen mit Datenaufzeichnung

Wie Abbildung 18 zeigt, gibt es insgesamt acht Geohashes, welche nur an einem einzelnen Tag befahren wurden. Dies suggeriert eine wenig befahrene Strecke oder könnte einen Umweg darstellen, der üblicherweise von den Bussen nicht genommen wird. Eine komplette Abdeckung an allen Tagen des betrachteten Zeitraums ergibt sich für lediglich neun von 126 Geohashes, welches einer Abdeckung von **7,14%** entspricht (erste Reduktion: **7,76%**; zweite Reduktion: **8,49%**).

Wie oben beschrieben, könnte eine mögliche Zuteilung der Busse zu wechselnden Linien sowie eine unterschiedliche Nutzung der Busse (Wartung/Reparatur) hier einen großen Einfluss auf die Metrik haben. Erweitert man das Betrachtungsfenster auf Geohashes, welche binnen eines Monats an 21-31 Tagen befahren wurden, dann lassen sich 55 Geohashes einbeziehen. Dies ergibt somit eine Abdeckung von **43,65% des inneren Rings** mit nahezu täglicher Datenerfassung. Unter Berücksichtigung der im Vorfeld dargelegten Reduktionen der Grundgesamtheit ergeben sich Abdeckungen von **47,41% des inneren Rings** (erste Reduktion auf Straßenebene) respektive von **51,89%** (zweite Reduktion unter Berücksichtigung der Linienführung).

Insgesamt lässt sich feststellen, dass unter den befahrenen Geohashes eine eher hochfrequente Abdeckung innerhalb des inneren Rings vorzufinden ist.

Äußerer Ring

Erweitert man den geographischen Horizont auf den Bereich innerhalb des äußeren Rings, ergibt sich das folgende Bild:

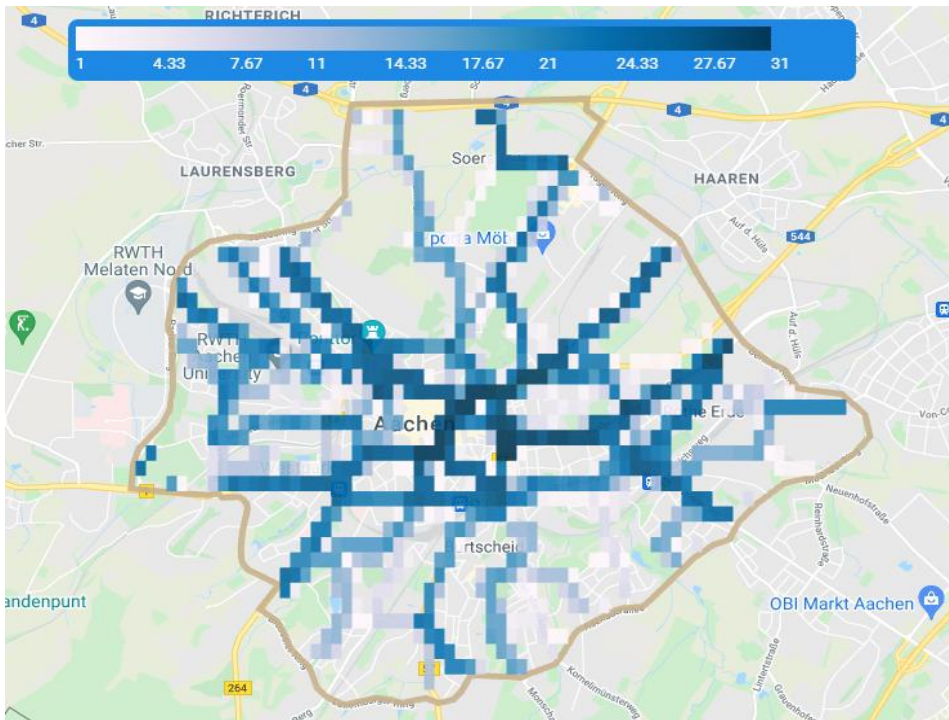


Abbildung 19: Anzahl der Tage, an denen im August 2021 pro Geohash im äußeren Ring Daten erfasst wurden

Neben dem Stadtzentrum gibt es auch an den Hauptverbindungsstraßen außerhalb des inneren Rings eine hohe Tagesabdeckung, die Peripherie und kleinere Wohnsiedlungen werden teilweise allerdings nur selten von Bussen befahren. Dies kann ein weiteres Indiz dafür sein, dass die einzelnen Linien von unterschiedlichen Bussen befahren werden und die ausgerüsteten Busse vermutlich teilweise in den Linien wechseln.

Histogramm der Tage mit Daten pro Geohash (äußerer Ring)

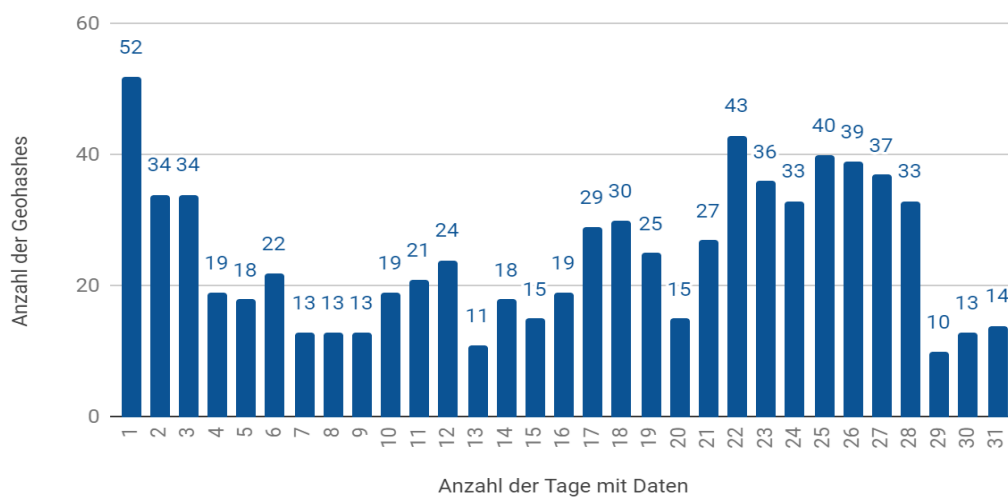


Abbildung 20: Histogramm der Häufigkeit der Geohashes innerhalb des äußeren Rings, aufgeteilt nach Tagen mit Datenaufzeichnung

Das Histogramm für die Tagesfrequenz der Geohash-Abdeckung zeigt, dass das von der Flotte befahrene Stadtgebiet innerhalb des äußeren Rings unterschiedlich oft von den Bussen erfasst wurde. Außerhalb des inneren Rings gibt es nur noch fünf weitere Geohashes (insgesamt 14), welche an jedem Tag besucht wurden. Hier beträgt die rechnerische Abdeckung der jeden Tag erfassten Geohashes im Vergleich zur Baseline (1592 Geohashes) lediglich 0,88%; nach Reduktionen 1,22% sowie 1,47%.

Eine **nahezu tägliche Datenerfassung** (21-31 Tage pro Monat) erreichen allerdings 325 der Geohashes, welches in der Baseline einer Abdeckung von **20,41% des Gebiets innerhalb des äußeren Rings** entspricht. Berücksichtigt man nur die Geohashes, auf denen es Straßen gibt, steigt die Abdeckung auf **28,41% (erste Reduktion)**; wenn nur das ASEAG-Netz betrachtet wird (**zweite Reduktion**), berechnet sich die Abdeckung auf **34,10%**.

An dieser Stelle wird die Hypothese aufgestellt, dass man nicht davon ausgehen kann, dass alle ASEAG-Busse an allen Tagen auf allen Linien fahren. Dies lässt sich damit begründen, dass die Zuteilung der Busse zu wechselnden Linien basierend auf den Entscheidungen des Flottenmanagements geschieht sowie die Busse unterschiedliche Nutzungsmuster durch Wartung und Reparatur haben. Außerdem ist an Wochenenden die Taktung der Busse geringer und es werden vermutlich weniger Busse gleichzeitig betrieben.

Untersuchung der Auslastung und Abdeckung der Busse im zeitlichen Verlauf

Zuletzt soll diskutiert werden, welche Auslastung die Busse an den einzelnen Tagen hatten und ob sich aus den Daten Muster zur Nutzung der Busse erkennen lassen. Es wird die Anzahl der fahrenden Busse pro Tag bestimmt sowie die durchschnittliche Geohash-Abdeckung der Busse (bzgl. 953 Geohashes) sowie Minimum und Maximum (jeweils von einem fahrenden Bus). Als ein fahrender Bus werden Busse definiert, die mehr als 5 verschiedene Geohashes an einem Tag besuchen, also nicht lediglich im Depot standen, sondern auf einer Linie unterwegs waren. Die Berechnung ist valide für Geohashes innerhalb des **äußeren Rings**.

Tabelle 6: Zeitlicher Verlauf der Auslastung und Abdeckung der Busse

Datum	Wochentag	Minimal	Maximal	Durchschnitt	Anzahl fahrender Busse
2021-08-01	Sonntag	177 (18.57%)	177 (18.57%)	177 (18.57%)	1
2021-08-02	Montag	23 (2.41%)	198 (20.78%)	95 (9.97%)	8
2021-08-03	Dienstag	9 (0.94%)	256 (26.86%)	97 (10.18%)	8
2021-08-04	Mittwoch	132 (13.85%)	292 (30.64%)	192 (20.15%)	6
2021-08-05	Donnerstag	20 (2.1%)	281 (29.49%)	98 (10.28%)	8
2021-08-06	Freitag	37 (3.88%)	310 (32.53%)	107 (11.23%)	9
2021-08-07	Samstag	16 (1.68%)	195 (20.46%)	90 (9.44%)	6
2021-08-08	Sonntag	49 (5.14%)	206 (21.62%)	128 (13.43%)	2
2021-08-09	Montag	24 (2.52%)	260 (27.28%)	131 (13.75%)	8
2021-08-10	Dienstag	26 (2.73%)	282 (29.59%)	166 (17.42%)	8
2021-08-11	Mittwoch	66 (6.93%)	175 (18.36%)	131 (13.75%)	7
2021-08-12	Donnerstag	13 (1.36%)	243 (25.5%)	126 (13.22%)	8
2021-08-13	Freitag	104 (10.91%)	138 (14.48%)	125 (13.12%)	4
2021-08-14	Samstag	171 (17.94%)	225 (23.61%)	198 (20.78%)	2
2021-08-15	Sonntag	67 (7.03%)	70 (7.35%)	69 (7.24%)	2
2021-08-16	Montag	11 (1.15%)	293 (30.75%)	124 (13.01%)	7
2021-08-17	Dienstag	7 (0.73%)	153 (16.05%)	78 (8.18%)	9
2021-08-18	Mittwoch	42 (4.41%)	304 (31.9%)	199 (20.88%)	8
2021-08-19	Donnerstag	12 (1.26%)	149 (15.63%)	80 (8.39%)	8
2021-08-20	Freitag	27 (2.83%)	198 (20.78%)	105 (11.02%)	9
2021-08-21	Samstag	24 (2.52%)	221 (23.19%)	84 (8.81%)	5
2021-08-22	Sonntag	65 (6.82%)	124 (13.01%)	92 (9.65%)	3
2021-08-23	Montag	88 (9.23%)	218 (22.88%)	147 (15.42%)	8
2021-08-24	Dienstag	23 (2.41%)	286 (30.01%)	153 (16.05%)	8
2021-08-25	Mittwoch	31 (3.25%)	171 (17.94%)	123 (12.91%)	8
2021-08-26	Donnerstag	22 (2.31%)	249 (26.13%)	124 (13.01%)	9
2021-08-27	Freitag	52 (5.46%)	217 (22.77%)	150 (15.74%)	9
2021-08-28	Samstag	54 (5.67%)	254 (26.65%)	176 (18.47%)	4
2021-08-29	Sonntag	74 (7.76%)	119 (12.49%)	97 (10.18%)	2
2021-08-30	Montag	16 (1.68%)	292 (30.64%)	153 (16.05%)	9
2021-08-31	Dienstag	17 (1.78%)	286 (30.01%)	153 (16.05%)	10

Anhand der gesammelten Daten lässt sich erkennen, dass zum jetzigen Zeitpunkt **niemals mehr als 10 Busse an einem Kalendertag im August** in Betrieb waren (s. Abbildung 21). Außerdem sind an Wochenenden, insbesondere Sonntagen, deutlich weniger Busse als an den sonstigen Tagen unterwegs. Im Hintergrund dieser Betrachtung ist zudem festzustellen, dass im Durchschnitt nur etwa 6,5 Busse pro Kalendertag Daten aufgezeichnet haben.

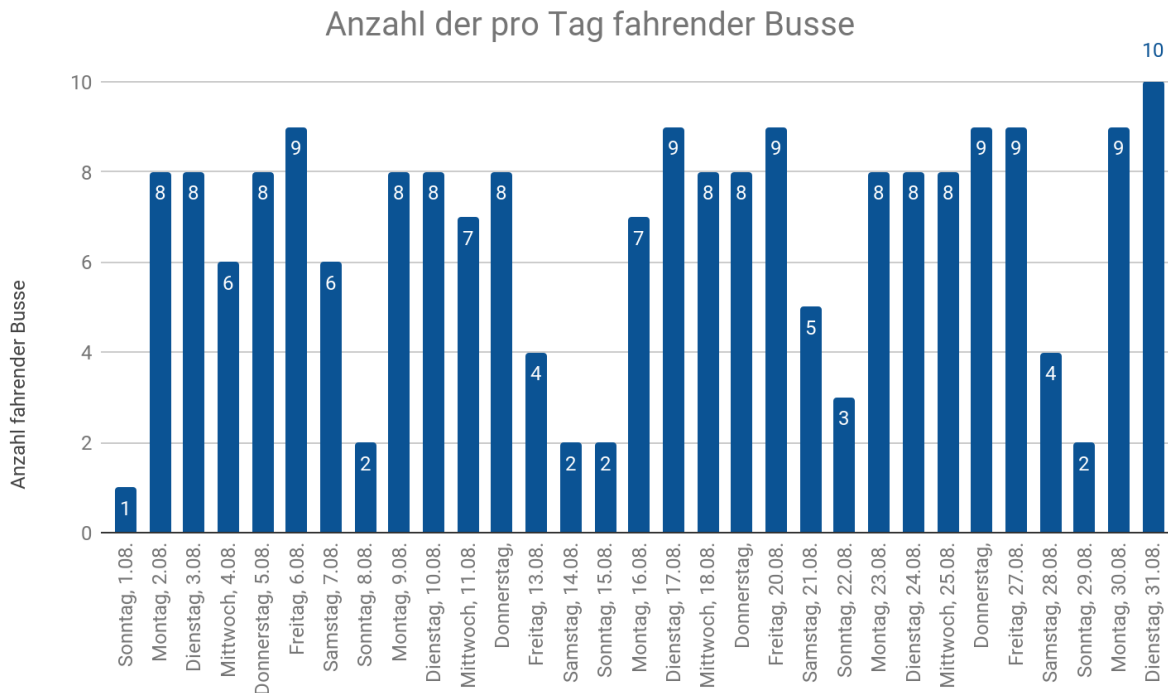


Abbildung 21: Anzahl der im August pro Tag aktiven Busse innerhalb des äußeren Rings

Die tatsächliche Zahl von gleichzeitig (also innerhalb von 15, 30, 60 Minuten) aktiven Fahrzeugen liegt vermutlich deutlich unter der **Maximalanzahl von 10 Bussen an einem Kalendertag**.

Frage 2: Wie viele Busse werden (noch) benötigt, um das Stadtgebiet ausreichend abzudecken?

Wie im Vorfeld beschrieben, ist eine Abhängigkeit des abgedeckten Gebietes von der Anzahl der eingesetzten Busse gegeben. In einem ersten Anlauf soll mit dieser Fragestellung zunächst eruiert werden, ob sich anhand der gegebenen Werte bestimmen lässt, wie viele Busse zusätzlich benötigt werden, um eine tägliche Stadtgebietsabdeckung von rund 65% zu erreichen.

Unter Betrachtung der täglichen Abdeckungen der Geohashes lässt sich die Anzahl der benötigten Fahrzeuge extrapolieren, um die geforderte Stadtgebietsabdeckung zu erreichen.

Hierzu wurde in einer Tabellenkalkulationssoftware eine Potenzreihe entwickelt, um eine mögliche Anzahl der am gleichen Tag fahrenden Fahrzeuge zu bestimmen.

Innerer Ring

Für den inneren Ring mit 106 Geohashes, welche theoretisch durch den Linienplan der ASEAG befahrbar sind, ergibt sich das folgende Bild:

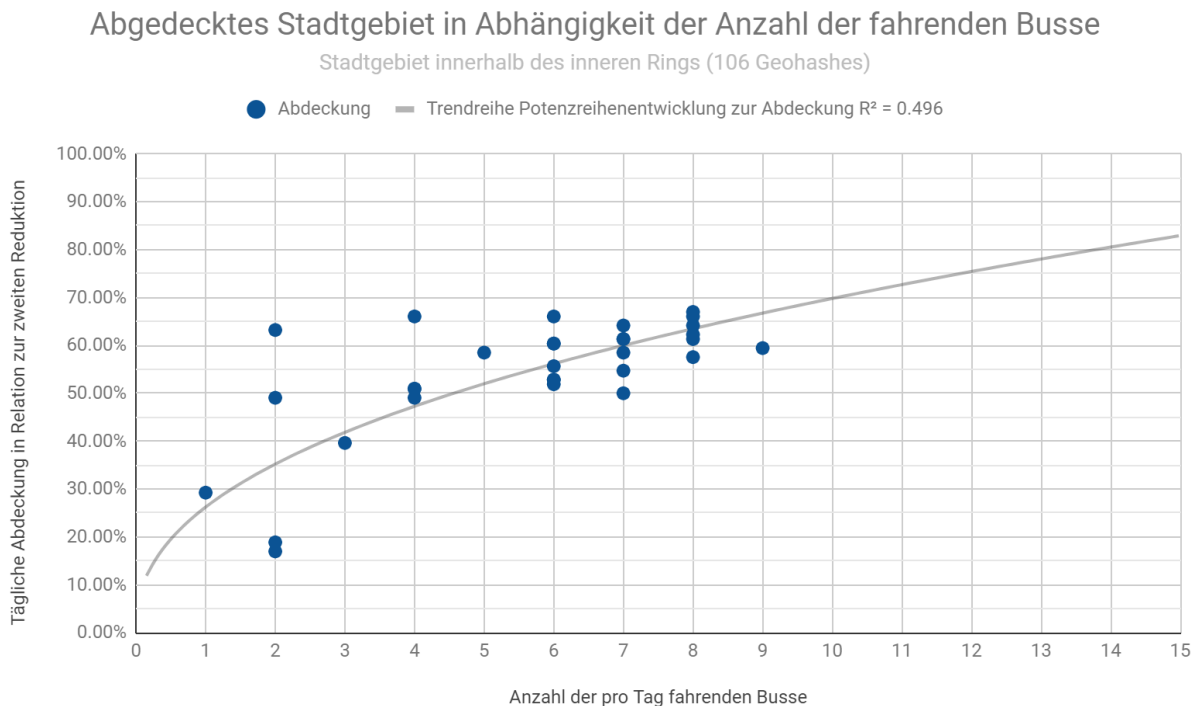


Abbildung 22: Regression der täglichen Stadtgebietsabdeckung (innerer Ring) basierend auf der Anzahl der pro Tag fahrenden Busse

Die errechnete Regressionsfunktion lautet: $y(x) = 0,262x^{0,425}$

Eine **Tagesabdeckung von rund 65% im inneren Ring von Aachen scheint ab einer Anzahl von neun Bussen möglich zu sein**, welche am gleichen Tag im Aachener Liniennetz fahren. Hierzu ist allerdings anzumerken, dass die tatsächlich benötigte Anzahl der mit Sensorik und Telematik ausgestatteten Busse um einiges höher sein könnte, da, wie im Vorfeld festgestellt, die Anzahl der tatsächlich fahrenden Busse (oder sogar der gleichzeitig, d.h. innerhalb eines 15, 30 oder 60-minütigen Zeitfensters fahrenden Busse) nicht immer genau bestimmbar ist. Dies hängt damit zusammen, dass Faktoren wie Linienplanung, Wartungsplanung oder der Wochentag die punktuelle Abdeckung signifikant beeinflussen.

Äußerer Ring

Wird stattdessen der äußere Ring von Aachen als Stadtgebiet betrachtet, ergibt sich die folgende Verteilung auf den 953 Geohashes, welche theoretisch durch die Linien der ASEAG abbildbar sind:

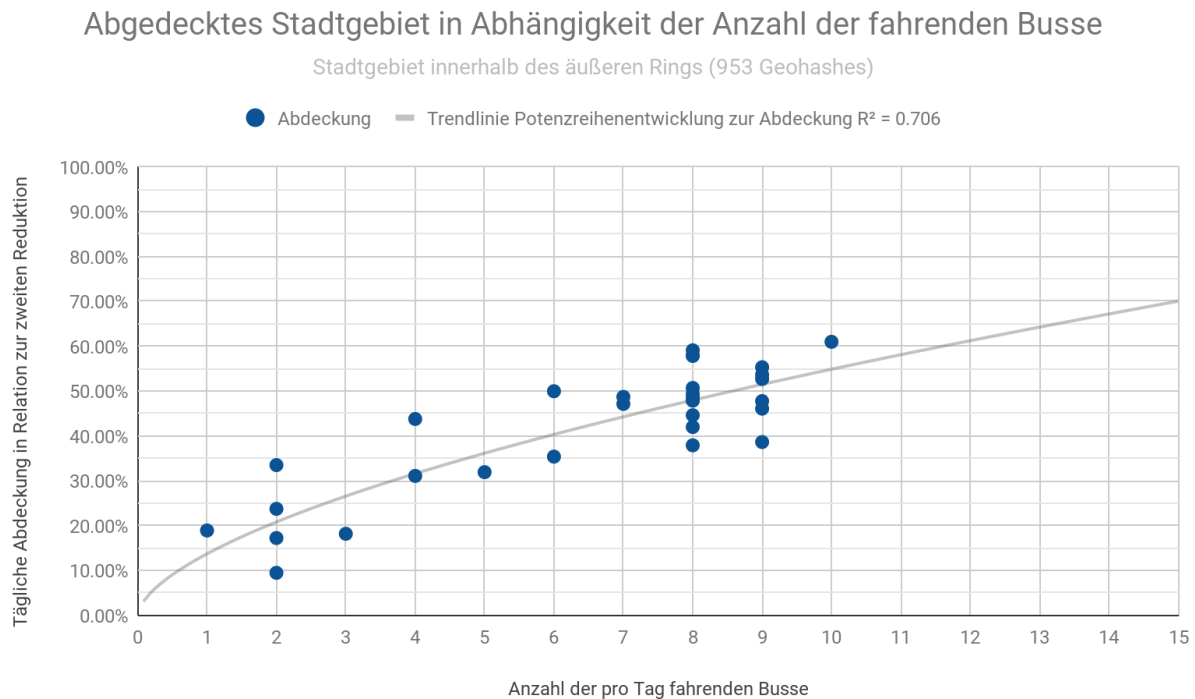


Abbildung 23: Regression der täglichen Stadtgebietsabdeckung (äußerer Ring) basierend auf der Anzahl der pro Tag fahrenden Busse

Die in der Tabellenkalkulation errechnete Regressionsfunktion ist dabei die folgende: $y(x) = 0,137x^{0,603}$

Eine Tagesabdeckung von 65% auf dem **gesamten Stadtgebiet lässt sich nach dieser Funktion ab einer Anzahl von etwa 13 Bussen** erreichen. Auch hier ist anzumerken, dass dieser Wert von mehreren bereits zuvor beschriebenen Faktoren abhängt und die tatsächliche Flottenausstattung um einiges höher sein müsste.

Frage 3: Lässt sich zuverlässig kalkulieren, wie viele Fahrzeuge in anderen Städten für eine ausreichend flächendeckende Datensammlung benötigt werden?

Nein, dies lässt sich nicht zuverlässig kalkulieren. Es war bis zum Einreichen dieses Berichts nicht möglich, aktiv in weiteren Städten Tests durchzuführen, um diese Frage empirisch beantworten zu können. Um hier allerdings eine gewisse Perspektive zu geben, lassen sich hierzu die folgenden **Annahmen** treffen, um eine Hochrechnung zu ermöglichen:

- In allen (deutschen) Städten mit ÖPNV existiert eine ähnliche Linienplanung im ÖPNV-Busnetz um das zu untersuchende Stadtzentrum, sowohl geographisch als auch taktzeitbezogen (inklusive der Veränderungen am Wochenende)
- Die Busse fahren ähnlich weite Strecken
- Die Busse werden vergleichbar oft gewartet

Unter diesen Annahmen ließen sich die Ergebnisse für Aachen auch auf weitere Städte anwenden und eine Empfehlung für die Städte aussprechen, in erster Instanz zum Beispiel proportional zur abzudeckenden Fläche der Stadt. So könnte von der Stadt Aachen mit einer Fläche von 160,86 km² auf die **Anzahl der auszustattenden Busse der Stadt Hamburg** geschlossen werden (Fläche von 755,09 km²); eine **flächendeckende Datenverfügbarkeit ergäbe sich dann bei rund 61 gleichzeitig fahrenden Bussen**. In der Praxis müssten allerdings weitere Städte pilotiert werden, um diese Annahmen zu bestätigen oder zu widerlegen.

Es ist allerdings auch möglich, auf Basis einer unvollständigen Abdeckung (bspw. in einem 30-minütigen Zeitfenster) fehlende Werte zu errechnen. Hierzu lassen sich folgende (teilweise externe) Datenquellen zurate ziehen, um aus den vorliegenden Messungen eine hyperlokale Luftqualitätskarte zu berechnen:

- Historische lokale Daten
- Topographie
- Windrichtung und -stärke
- Verkehrsfluss

Dies soll im Folgenden in einer vereinfachten Form dargestellt werden.

Exemplarische Hochrechnung der Daten anhand des Kriging-Algorithmus

Es wird ein Verfahren aus der Geostatistik angewandt, um anhand einer unvollständigen Stichprobe diskreter Werte mit Ortsinformation auf eine Gesamtflächenverteilung zu schließen. Dies geschieht durch eine Interpolation der gegebenen Werte, orientiert an dem örtlich nächsten

Nachbarn. Weitere Informationen zu dem gewählten Verfahren können unter dem Stichwort **Kriging** nachgeschlagen werden (CRESSIE 1988).

Es wurde Mittwoch, der 04. August 2021, ausgewählt, um anhand der gegebenen Messdaten von Feinstaub eine Verteilung über das gesamte Stadtgebiet hochzurechnen. Wie oben dargestellt, waren an diesem Tag sechs der ASEAG-Buslinien unterwegs. Innerhalb des äußeren Rings wurden exakt 500 Geohashes abgedeckt und entsprechende PM10-Daten gespeichert. Wenn pro Geohash mehrere Werte zu unterschiedlichen Zeiten vorlagen, wurde der Durchschnitt dieser Werte gebildet. Da hier eine Aggregation auf Tagesebene stattgefunden hat, ist die Aussagekraft nur bedingt valide für eine hyperlokale Luftqualitätsdatenerfassung, allerdings lässt sich der Algorithmus mit diesem Beispiel angemessen demonstrieren.

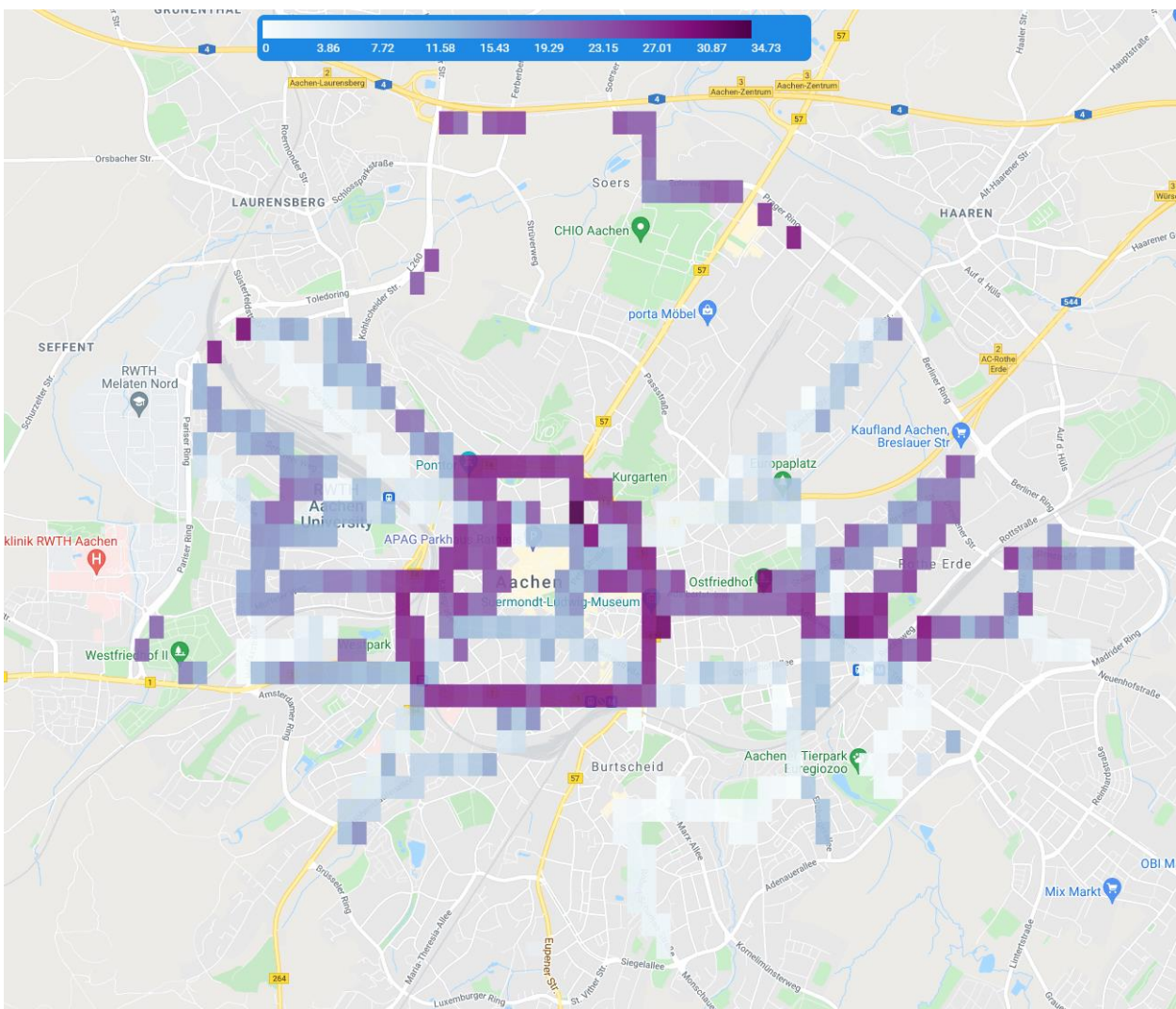


Abbildung 24: Über den gesamten Tag des 04. August 2021 gemittelte PM10-Werte pro Geohash-7 innerhalb des äußeren Rings

Je dunkler ein Geohash eingefärbt ist, desto schlechter ist die lokale über den Tag gemittelte Luftqualität. Insgesamt wurden bis zu ungefähr $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 pro Geohash im Stadtgebiet ermittelt. Die gegebenen Daten wurden mittels des Kriging-Verfahrens auf das gesamte Stadtgebiet innerhalb des äußeren Rings extrapoliert, um so eine potentielle Verteilung der PM10-Werte zu erhalten.

Die errechnete Verteilung sieht wie folgt aus:

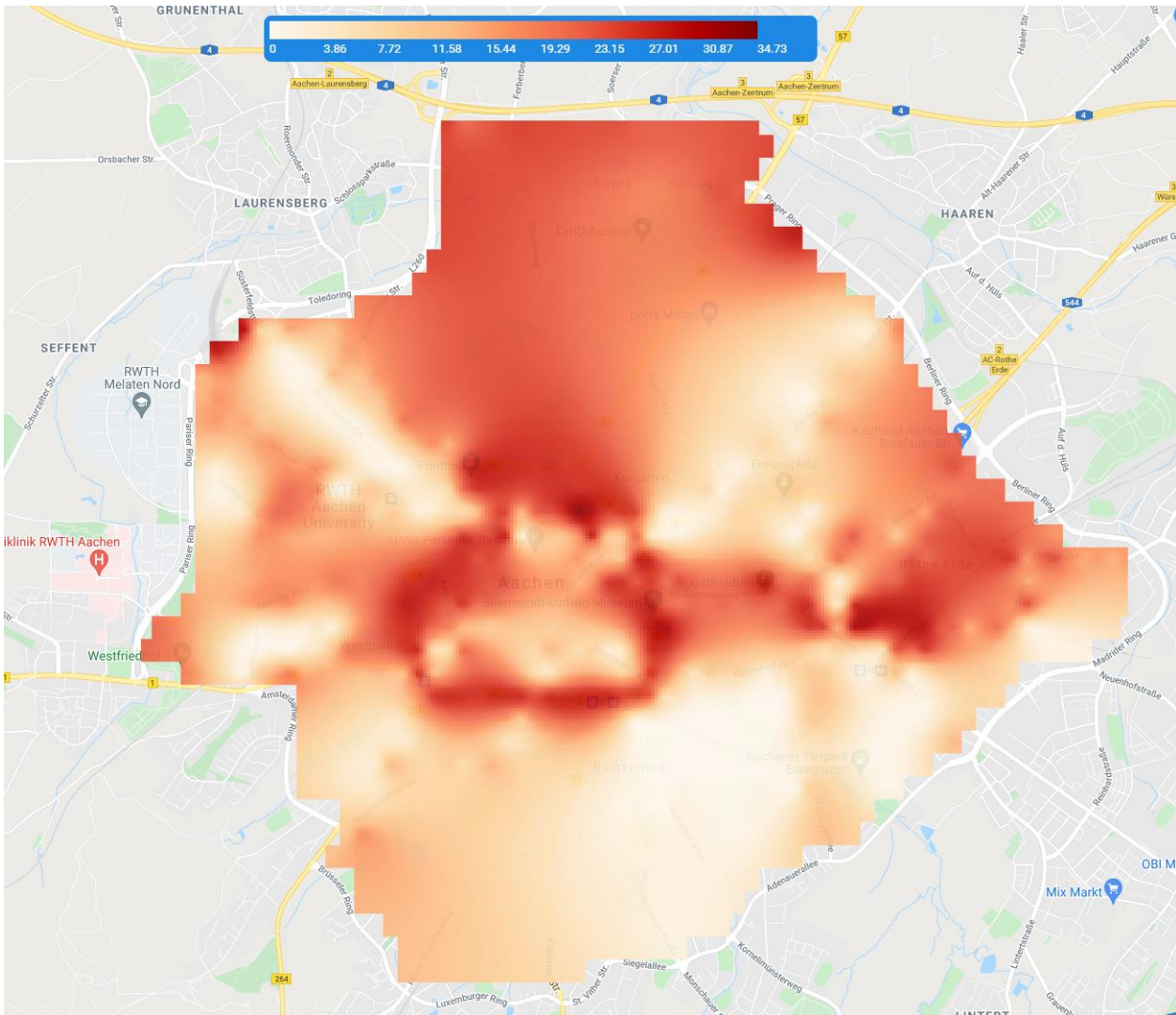


Abbildung 25: Anwendung des Kriging-Verfahrens auf die gemittelten PM10-Werte (04. August 2021) zur Ergänzung zu einer Karte

Je dunkler/roter ein Bereich eingefärbt ist, desto stärker ist die lokale PM10-Belastung; je heller/gelber ein Bereich eingefärbt ist, desto schwächer ist die Belastung. Es sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass Qualität sowie Aussagekraft der Berechnung mit einer höheren Anzahl von aktiven Fahrzeugen sowie einer geringeren Aggregationsdauer (maximal 60 Minuten) gesteigert

werden können. Je mehr Daten verfügbar sind, desto geringer sind die Abstände zwischen den Stützpunkten des Algorithmus und desto weniger fehlerbehaftet ist die Schätzung. Außerdem lässt sich durch mehr Daten und eine kleinere Aggregationsdauer (bspw. 60 Minuten) die Veränderung der PM10-Belastung über den Tag darstellen und entsprechend bewerten. Aktuell fehlt in der ausgerüsteten Flotte noch die Kontinuität in den Nutzungsprofilen und die Anzahl der Flottenbewegungen.

In Zukunft kann zusätzlich zu den erhaltenen Werten noch, wie oben beschrieben, die Windgeschwindigkeit und -richtung sowie die Topographie der Region betrachtet und Verkehrsdaten zur weiteren Validierung der Werte eingesetzt werden. Ein ähnlicher Ansatz wird von Plume Labs gewählt mit der World Air Map.

Frage 4: Wie können weitere Fahrzeugtypen mit Sensoren ausgestattet werden und wie ist der Einfluss der Einbauposition auf die Messwerte?

Während der Entwicklung der Sensorik war Flexibilität ein großer Faktor. Die Sensoreinheit wurde so entwickelt, dass sie bei einer großen Vielfalt an Fahrzeugen einsetzbar ist:

- Das Gerät ist sowohl mit Fahrzeugen mit einer Bordnetzspannung von 12 Volt (Autos, Vans) als auch von 24 Volt (Busse, LKWs) kompatibel, da die eingebauten Spannungsregler Spannungen von 12 bis 40 Volt unterstützen.
- Der flexible Lufteinlass erlaubt es, die Einheit sicher im Inneren des Fahrzeugs zu montieren, während nur der schmale und stabile Schlauch durch eine Öffnung nach außen geführt wird. Dies ermöglicht eine sichere Befestigung, eine einfache Stromversorgung sowie eine optimale Platzierung des Lufteinlasses.

Der empfohlene Höhenunterschied zur Straße für den Lufteinlass des Sensors liegt zwischen 1,5 und 4 Metern (ANHANG 3 ABS. C SATZ 4 39. BLMSCHV), damit die Sensormessungen mit den offiziellen Messungen vergleichbar sind. Diese hohe Platzierung hat den weiteren Vorteil, den Effekt der Emissionen des eigenen Fahrzeugs (Brems- und Reifenabrieb) zu verringern, welche die Messungen verfälschen würden. Bei Bussen sollte der Lufteinlass daher auf dem Dach oder an den Seiten befestigt werden. Die meisten PKWs haben eine Höhe knapp über 1,5 Metern, wodurch das Dach des Fahrzeugs der ideale Ort für den Lufteinlass ist.

Beispiel-Installationen:

1. VDL Stadtbus

- a. Die Sensoreinheit wird im Elektronik-Regal in dem Fahrzeug installiert
- b. Der Strom für die Einheit wird von einer Sicherung aus der Sicherungsbox in dem Elektronik-Regal abgezweigt
- c. Der Schlauch des Lufteinlasses wird durch die technische Öffnung in der Klimaanlage des Busses geführt
- d. Der Lufteinlass wird auf dem Dach des Busses befestigt



Abbildung 26: Befestigung des Sensors im Elektronik-Regal des Busses sowie Verlegung der Kabel zur Sicherungsbox sowie zum Dach (Lufteinlass)



Abbildung 27: Ausrüstung eines VDL-Stadtbusses im Werk der ASEAG



Abbildung 28: Detailansicht des Lufteinlasses entgegengesetzt zur Fahrtrichtung

2. PKW

- a. Die Sensoreinheit wird im Kofferraum des Fahrzeugs installiert
- b. Die Einheit wird mit einem Stecker für den Zigarettenanzünder mit der 12-Volt-Stromversorgung verbunden
- c. Der Schlauch des Lufteinlasses wird durch die Kofferraumdichtung geführt
- d. Der Lufteinlass wird dann auf dem Dach des Fahrzeugs befestigt



Abbildung 29: Verstauung des AirQuality-Sensors im Kofferraum eines PKW



Abbildung 30: Lufteinlass bei Installation im PKW

Frage 5: Wie wirkt sich die Fahrzeuggeschwindigkeit auf die Messwerte aus?

Eine weitere Frage, die sich an dieser Stelle stellt, ist die Abhängigkeit der ermittelten PM10-Werte von der gefahrenen Geschwindigkeit. Durch eine Positionierung des Sensors auf dem Dach des Busses außerhalb Reichweite des Abgastrakts sowie einer aktiven Frischluftzufuhr durch die Vakuumpumpe des Sensors wird die **Hypothese** aufgestellt, dass die **im System erhobenen Messwerte unempfindlich auf die Fahrzeuggeschwindigkeit** sind.

Im Folgenden sind die im August 2021 erfassten durchschnittlichen PM10-Werte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsverteilung dargestellt, sowie die pro Geschwindigkeitsband erfassten Datenpunkte. Es lässt sich erkennen, dass die höchsten Durchschnittswerte im Stillstand (0 km/h) sowie bei einer Geschwindigkeit von 1-5 km/h aufgezeichnet werden, jeweils mit rund $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Für höhere Geschwindigkeiten lässt sich festhalten, dass die Durchschnittswerte um einen konstanten Wert von rund $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ streuen. Die meisten Werte wurden bei einer Geschwindigkeit von 30-35 km/h erfasst, auch geringe Geschwindigkeiten sowie Stillstand erzeugten jeweils knapp 100.000 Werte pro Geschwindigkeitsband.

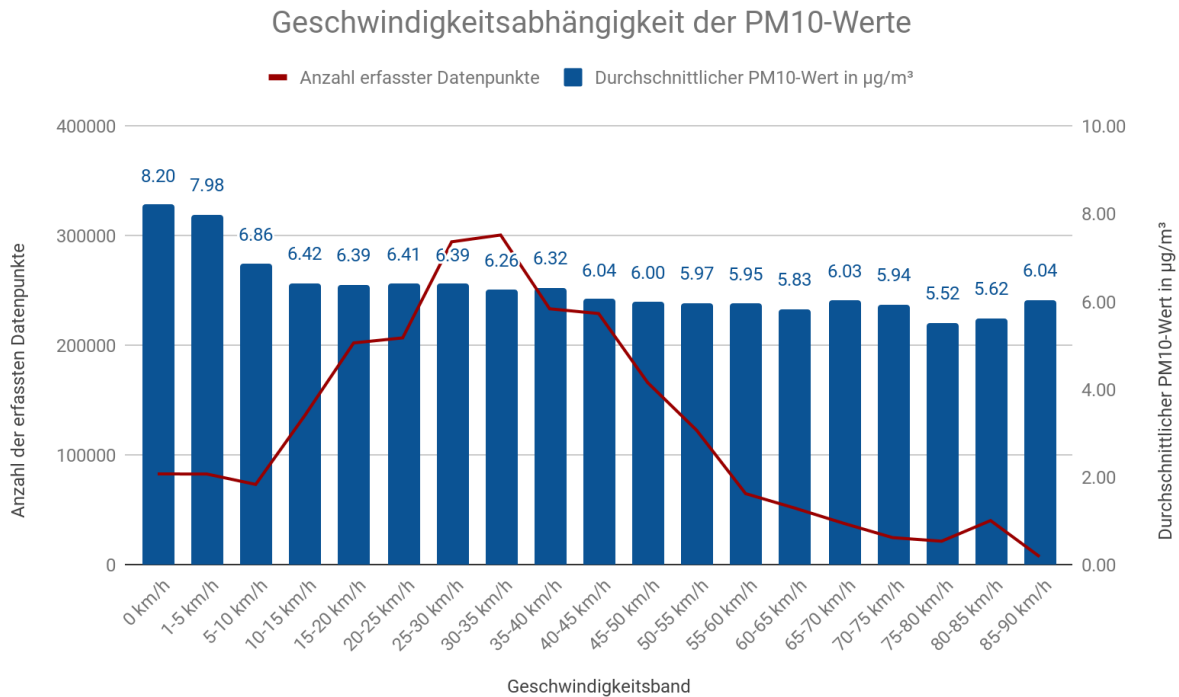


Abbildung 31: Gemittelte PM10-Werte (in blau) in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsbands sowie Anzahl der erfassten Datenpunkte (rot) für den Monat August 2021

Es wird an dieser Stelle vermutet, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten oder Stillstand (Stau, Ampel etc.) durch die laufenden Motoren in der Umgebung lokal unterschiedlich viel Feinstaub emittiert wird und sich dies auch in den gemessenen Werten niederschlägt. Bei Geschwindigkeiten ab ca. 10 km/h ist der Verkehrsfluss stark genug, um nicht die lokal emittierten Werte von den Motoren der stillstehenden Fahrzeuge zu messen. Dass bei höheren Geschwindigkeiten keine signifikanten Unterschiede in der Messung festzustellen sind, lässt sich wie folgt erklären: Für die Pumpe ist die Fahrzeuggeschwindigkeit nicht von Belangen, da sie ein konstantes Durchsetzungsvolumen von 5 l/min hat und somit eine laminare Strömung vorliegt. Die **oben getroffene Hypothese konnte** also für die vorliegenden Daten zunächst **bestätigt werden**.

Es könnte an dieser Stelle eine aerodynamische Analyse der Verwirbelungen des Busses durchgeführt werden, um eine genauere Aussage zur Konstanz des Volumenstroms zu treffen. Es könnte sein, dass die Verwirbelung des Luftstroms den gemessenen PM-Wert bedingt. Eine solche Untersuchung übersteigt an dieser Stelle allerdings den Umfang dieses Berichts.

Frage 6: Wie groß ist die Abweichung der Messwerte zwischen mobilen und stationären Sensoren?

Wie im Folgenden dargestellt, konnten die mobilen Sensoren des AirQuality-Projekts anhand einer Messstation des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen (LANUV) validiert werden. Im innerstädtischen Gebiet der Stadt Aachen befindet sich die Messstation Aachen Wilhelmstraße VACW/DENW207. Diese liegt auf der Ostflanke des inneren Rings. Dort werden Daten zu Feinstaub (PM10), Stickstoffoxiden, Schwefeldioxid, Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte sowie Windgeschwindigkeit und -richtung gesammelt.

Auf dem Dach der Messstation wurden drei kurze Messzyklen sowie ein Langzeit-Messversuch mit externer Stromversorgung durchgeführt, um die Daten zu Temperatur und Feinstaub zu vergleichen. Das LANUV unterstützte die Messreihen aktiv mit Erlaubnis der Messungen auf dem Dach sowie der Bereitstellung von rohen Sensormesswerten in 5-sekündiger Auflösung. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst.



Abbildung 32: Installation der AirQuality-Sensorbox auf dem VACW-Messstationscontainer in der Wilhelmstraße in Aachen



Abbildung 33: Lokalisierung der AirQuality-Box auf dem Dach des stationären Messecontainers VACW in der Aachener Wilhelmsstraße

Temperatur

Hier dargestellt ist die Temperaturkurve der zweiten Testreihe, welche vom 02. Juni 2021 bis 06. Juni 2021 durchgeführt wurde. Die Messwerte vom AirQuality -Sensor sind in roter Farbe darstellt, die Referenzmessung des VACW-Sensors in orange.

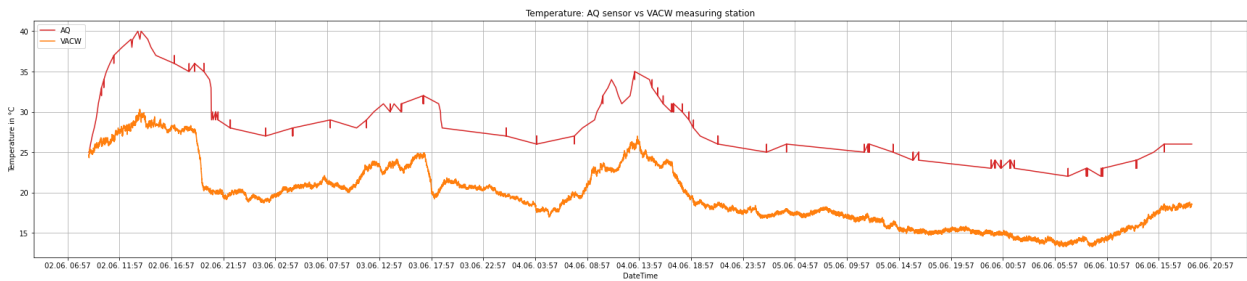


Abbildung 34: Vergleich der Temperaturkurven zwischen AirQuality-Sensor (rot) und VACW-Messstation (orange) für Messreihe vom 02. Juni 2021 bis 06. Juni 2021

Auf den ersten Blick ist zu erkennen, dass die Temperaturkurven um ca. 10 °C auseinander liegen und die Verläufe in vergleichbarer Form vorliegen. Die Temperaturkurve des AirQuality-Sensors steigt schnell an, innerhalb kurzer Zeit etabliert sich ein Differenzband von etwa 10 °C zu den VACW-Sensordaten. Man kann davon ausgehen, dass sich der AirQuality-Temperatursensor in der Nähe einer Wärmequelle befindet. Diese Quelle, die sich möglicherweise innerhalb des Gehäuses des AirQuality-Sensors befindet, strahlte so viel Wärme ab, dass sie die Temperaturverschiebung zwischen den beiden verglichenen Signalen verursachte. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf einen konkreten Vergleich der Temperaturkurven verzichtet.

An den beiden weiteren Messreihen zeigt sich ein ähnliches Phänomen, das sich aufbauende Differenzband ist allerdings zwischen 5 °C und 12 °C zu verorten. Da auch die vom AirQuality-Sensor ermittelte **relative Luftfeuchtigkeit**, welche physikalisch in Abhängigkeit von Temperatur und Luftdruck steht, entsprechend schwankt, sind diese beiden Datenpunkte für weiterführende Analysen nicht geeignet. In einem zukünftigen Sensordesign wird dies mitberücksichtigt, um die Lufttemperatur und die relative Feuchte korrekt abbilden zu können.

Feinstaub

Als Hauptaugenmerk des AirQuality-Projekts und zur Beantwortung der Fragestellung soll nun der PM10-Wert zwischen mobilem AirQuality-Sensor und stationärer VACW-Messanlage verglichen werden. Im Folgenden dargestellt ist in blauer Farbe die AirQuality-Sensormessung sowie in violett die Referenzmessung der VACW-Messstation; wie oben auch aufgenommen als Teil der zweiten Messreihe vom 02. Juni 2021 bis zum 06. Juni 2021.

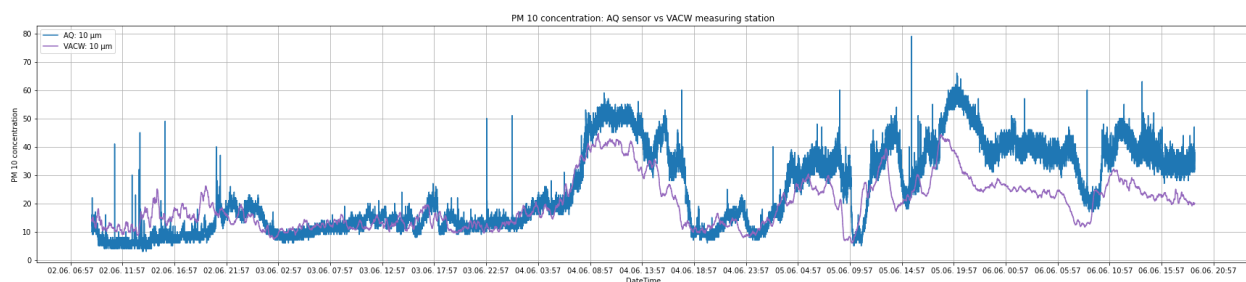


Abbildung 35: Vergleich der PM10-Konzentration zwischen AirQuality-Sensor (blau) und VACW-Messstation (violett) für Messreihe vom 02. Juni 2021 bis 06. Juni 2021

Die oben dargestellte Abbildung 35 zeigt die PM10-Konzentration, die von beiden Sensoren ermittelt wurde.

Zu Beginn des Testlaufs am 02. Juni tendiert der AirQuality-Sensor dazu, die PM10-Konzentration im Vergleich zu den Referenzdaten zu niedrig zu messen, wobei weitere

AirQuality-Spitzen eine hohe lokale Konzentration messen. Am zweiten Tag (03. Juni) zeigen die AirQuality- und VACW-Werte eine ähnliche gemessene Konzentration.

Ab dem dritten Tag scheint die AirQuality-PM10-Konzentration etwas höher zu sein als die Referenzkonzentration der VACW-Messstation, wobei der AirQuality-Sensor im Vergleich zum VACW-Sensor ca. $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mehr feststellt. Beide Sensoren zeigen eine hohe PM10-Konzentration, beginnend an den frühen Morgenstunden des 04. Juni (von 4 Uhr bis 11 Uhr Ortszeit). Der AirQuality-Sensor weist eine etwas höhere PM10-Konzentration auf als der VACW-Referenzsensor ($\sim 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gegenüber $\sim 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Insgesamt zeigen die Sensoren ein ähnliches Muster, und beide folgen den gleichen Trends.

Durch die Verknüpfung der beiden Datenquellen können die Sensoren miteinander verglichen und ein Pearson-Korrelationskoeffizient berechnet werden, um eine lineare Korrelation zwischen den Sensoren zu untersuchen. Dieser beträgt für die drei vergangenen Messreihen die folgenden Werte:

Tabelle 7: Pearson-Korrelationskoeffizient zu PM10 zwischen AirQuality und VACW

Messreihe	Zeitraum	Dauer	Pearson-Korrelationskoeffizient zu PM10 zwischen AirQuality und VACW
#1	19. Mai 2021 bis 21. Mai 2021	3 Tage	74.01%
#2	02. Juni 2021 bis 06. Juni 2021	4 Tage	81.93%
#3	14. Juni 2021 bis 18. Juni 2021	5 Tage	60.78%

Frage 7: Wie wirken sich Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Luftqualität bzw. die Messwerte aus?

Wie bereits im Vorfeld festgestellt, sind die von den AirQuality-Sensoren ermittelten Messwerte zu Temperatur sowie Luftfeuchtigkeit nicht belastbar, da die Temperatur im Vergleich zur Außentemperatur in der Testreihe keine guten Resultate erzielte und wir den in der Box gemessenen Luftfeuchtwerten eine ebenso geringe Validität zuschreiben.

Allerdings wird vom Forschungsteam vermutet, dass die Luftfeuchtigkeit einen großen Einfluss auf die Messqualität hat und für weitergehende Untersuchungen unbedingt berücksichtigt werden soll. An dieser Stelle wird auf eine Beantwortung von Frage 7 verzichtet. Das Team bemüht sich, für diese Problematik zukünftig eine Hardware-Lösung zu finden.

Frage 8: Welche Use Cases im Bereich Smart City (z.B. Stadtplanung, Verkehrssteuerung etc.) lassen sich mit mobiler Luftqualitätserfassung angehen?

Durch das mobile IoT-Netz von AirQuality lassen sich Luftqualitätsdaten hyperlokal erfassen und in Echtzeit abbilden. Mit dieser Grundlage können eine Vielzahl von Anwendungsfällen umgesetzt werden. Um die Anwendungsfälle mit dem größten Potential zu identifizieren, wurden die Städtepartner Aachen, Gelsenkirchen und Halle an der Saale in den Entwicklungsprozess eingebunden. In Workshops wurden die Anwendungsfälle identifiziert und diskutiert. Das größte Potential wurde dafür in folgenden Anwendungsfällen gesehen (Abbildung 36 bis Abbildung 39):

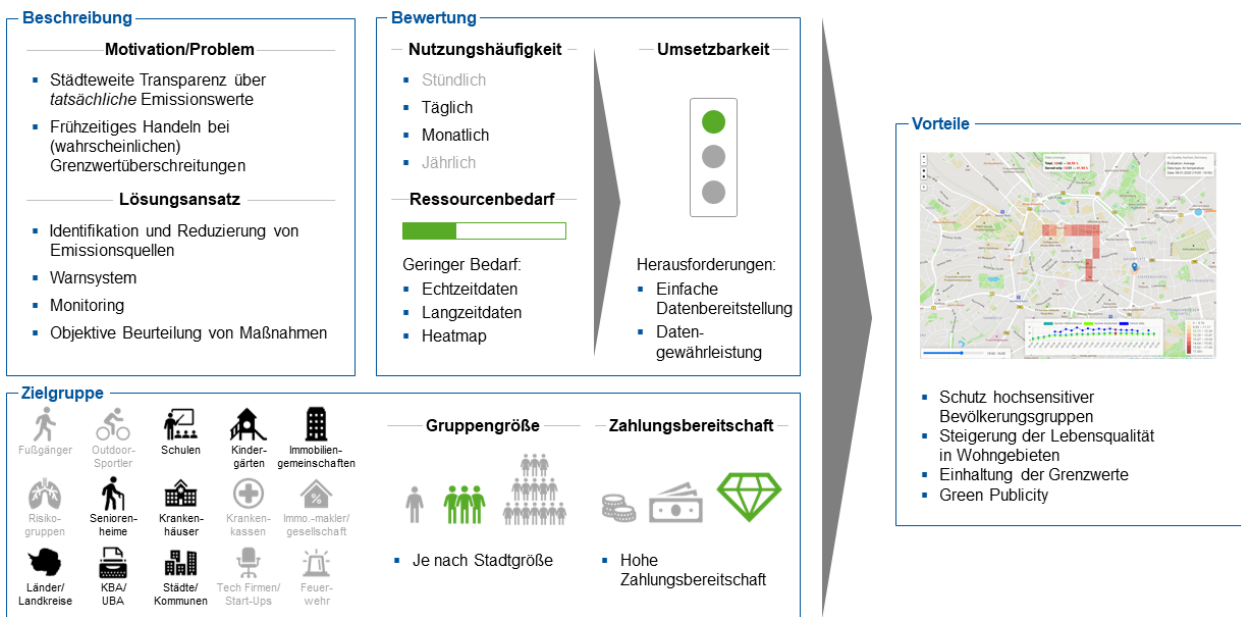


Abbildung 36: Use Case 1 - Identifikation und Reduzierung von Orten hoher Feinstaubbelastung

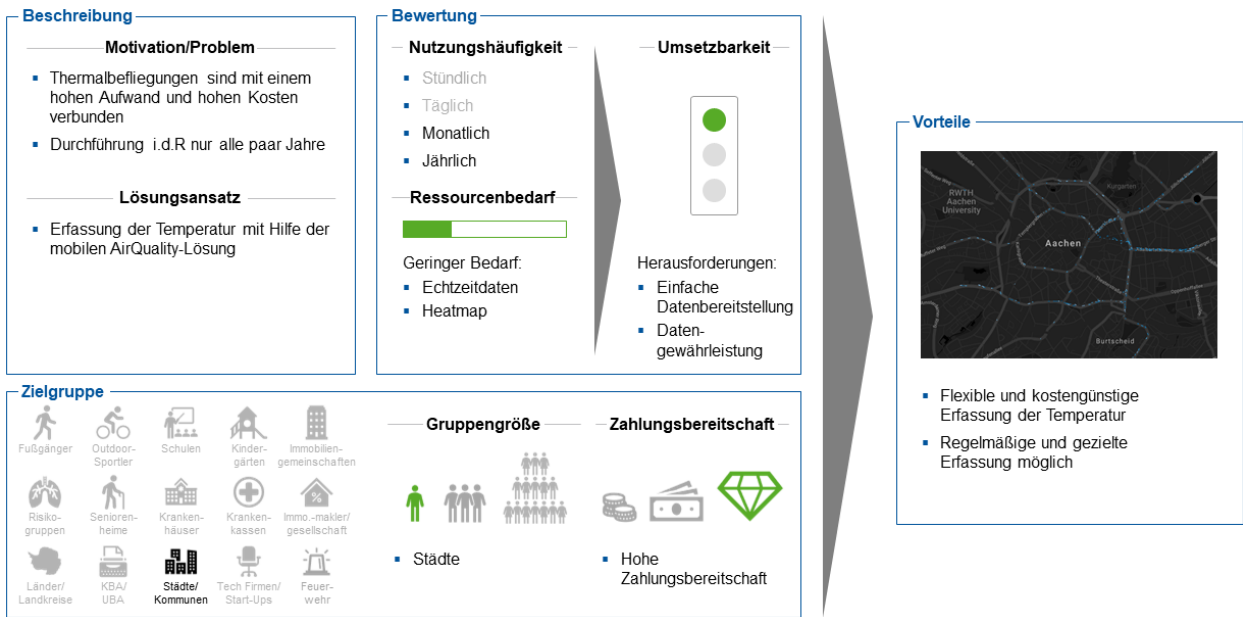


Abbildung 37: Use Case 2 - Erstellung von Thermalbildern

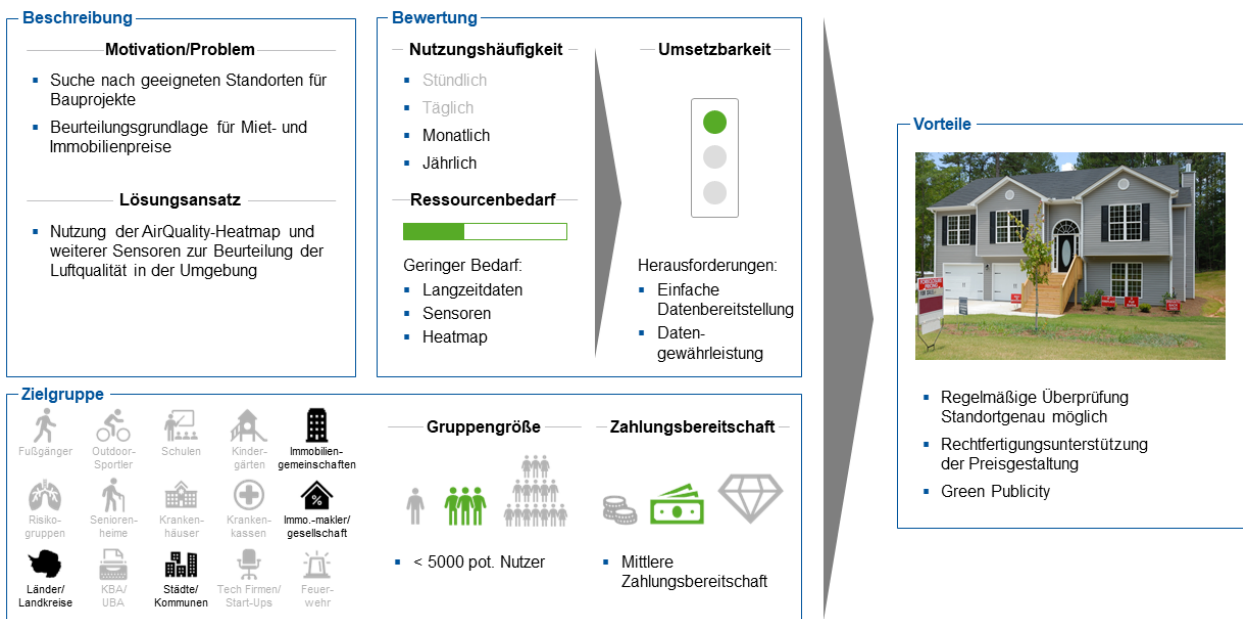


Abbildung 38: Use Case 3 - Beurteilung der Umgebungsluft bei Bauprojekten

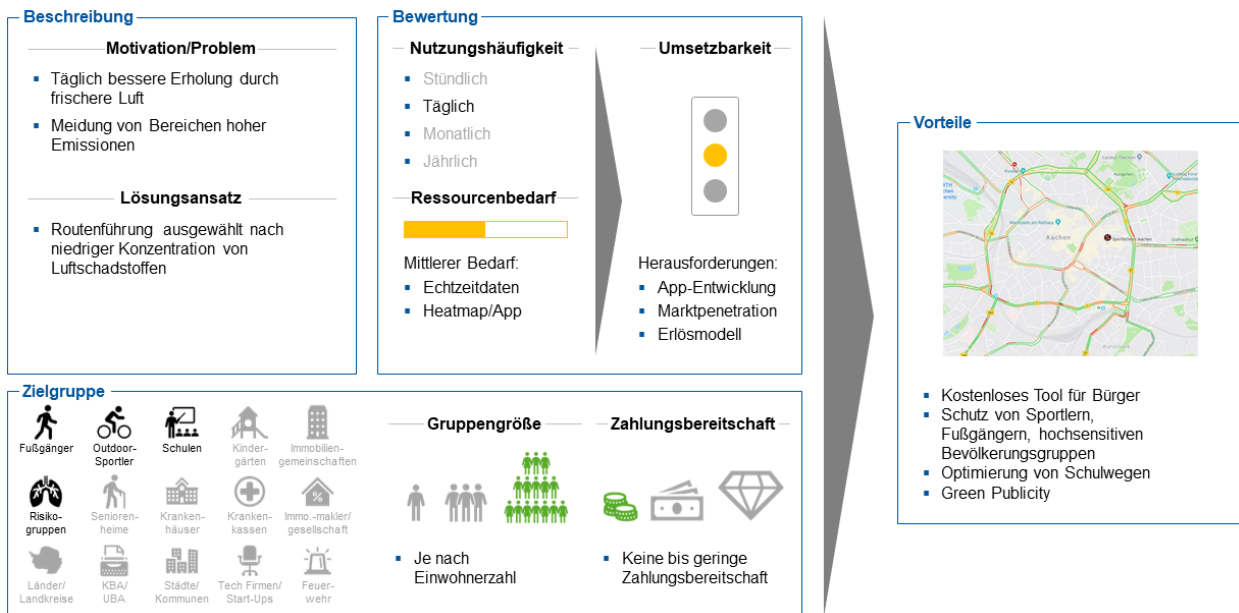


Abbildung 39: Use Case 4 - Routenoptimierung für täglich frische Luft

Von den oben aufgezeigten Use Cases lassen sich die Use Cases 1, 2 und 3 (Identifikation und Reduzierung von Hotspots, Erstellung von Thermalbildern, Beurteilung der Umgebungsluft bei Bauprojekten) mit dem Entwicklungsstand des Projektes nach Abschluss problemlos umsetzen. Diese Anwendungsfälle stellen vor allem für Städte und Kommunen einen Lösungsansatz dar. Use Case 4 (Routenoptimierung für täglich frische Luft) hingegen adressiert vorrangig Bürger, die auf ihren täglichen Wegen im Stadtgebiet diejenigen Gebiete meiden möchten, die eine höhere Luftverschmutzung aufweisen. Hierfür bedarf es jedoch noch weiterer Ressourcen, beispielsweise eines Applikationsentwicklers, um die Daten der breiten Masse verfügbar zu machen.

Ebenfalls diskutiert wurde die Möglichkeit, die weiträumig erfassten Umweltdaten zu nutzen, um diese in eine intelligente Lichtsignalsteuerung einfließen zu lassen. So ließe sich der Verkehrsfluss anpassen, um Hotspots zu reduzieren. Die Umsetzung dieses Anwendungsfalles ist jedoch wesentlich komplexer und umfangreicher und ist eher zu einem späteren Zeitpunkt machbar. Ideal wäre es, einen Städtepartner gewinnen zu können, der bereit wäre diese Smart-City-Anwendung als Pilotprojekt durchzuführen. Die Diskussionen in den Workshops verdeutlichten, dass Luftreinhaltung ein komplexes Thema ist, welches von vielen Faktoren beeinflusst wird. Werden Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität ergriffen, mögen diese die Situation an einem Ort bessern, könnten sich aber negativ auf andere Stadtgebiete auswirken. Es ist also ein vorsichtiges Abwägen von positiven und negativen Auswirkungen und umso wichtiger ist die Verfügbarkeit eines objektiven Tools, um diese Veränderungen und potentiellen Verlagerungen nachvollziehen zu können.