

APEROL

Schlussbericht von MAT.TRAFFIC GmbH

02.06.2021

Dr. Paul Mathias, Christian Dowideit, Tuan Nguyen, MAT.TRAFFIC GmbH
Heinrichsallee 40, 52062 Aachen

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	4
2	Aufgabe und Rahmenbedingungen	5
2.1	Aufgabenstellung	5
2.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	7
2.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	8
2.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	8
2.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
3	Ergebnisse und Nutzen	10
3.1	Erzielte Ergebnisse.....	10
3.1.1	Pilotbetrieb und Umsetzung	10
3.1.1.1	Verfahrensbeschreibung.....	11
3.1.1.2	Datenquellen.....	12
3.1.1.3	Fusion.....	12
3.1.1.4	Modifizierung der Werte	13
3.1.1.5	Visualisierung der Werte	13
3.1.2	Entwicklung der Mobilitätsdienste.....	14
3.1.2.1	Systemüberblick mit APEROL Simulation	14
3.1.2.2	Subsystem Verkehrssimulation	15
3.1.2.3	Subsystem Flottenmanagement.....	16
3.1.2.4	MATSim Konfiguration	19
3.1.2.5	Simulation Experimente	26
3.2	Voraussichtlicher Nutzen	32
3.3	Bekannt gewordener Fortschritt.....	32
3.4	Erfolgte bzw. geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	32
4	Adresse und Ansprechpartner des Projektpartners MAT.TRAFFIC GmbH	33

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 2.1: APEROL Projektstruktur. Die Hauptarbeitspakete von MAT.TRAFFIC sind farblich hervorgehoben.	7
Abbildung 3.1: Das APEROL Testfeld Aachen Innenstadt mit den Shuttle-Haltestellen (blaue Punkte), die größtenteils mit den bereits vorhandenen ASEAG-Haltestellen übereinstimmen.	11
Abbildung 3.2: Systemüberblick Testfeld Aachen Innenstadt. Das System umfasst, neben der eigentlichen Verkehrslageberechnung, Schnittstellen zu den dynamischen Daten der Verkehrsinfrastruktur und eine Visualisierungsoberfläche.	12
Abbildung 3.3: Der Schnitt eines Polygonzugs und die Datenfusion.	13
Abbildung 3.4: Die Online-Visualisierung des APEROL Testfeldes in Aachen mit verschiedenen Farben für unterschiedliche Reisezeiten.	14
Abbildung 3.5: Systemübersicht APEROL: Simulation mit emulierter Flottenmanagementzentrale.	15
Abbildung 3.6: Das Aachener Straßennetz (links) und das generiertes Simulationsnetzwerk (rechts).	20
Abbildung 3.7: Verkehrsnachfragedaten aus der Stadt Aachen: Die Stimmbezirke der Stadt, die als Herkunfts-Ziel-Zonen für die Verkehrsnachfrage herangezogen werden (links). Und die entsprechenden Teile des Simulationsnetzes (rechts).	21
Abbildung 3.8: Die Buslinien in Aachen.	22
Abbildung 3.9: Positionen der 140 signalisierten Knotenpunkte in der Aachener Stadtsimulation.	23
Abbildung 3.10: Die Servicepunkte (ÖPNV und autonome Shuttles) im Simulationsnetz Aachen.	24
Abbildung 3.11: Die Grafik zeigt die Korrelation von TomTom- und Simulationsfahrzeiten für alle Netzwerkverbindungen. Wie zu sehen ist, befindet sich die Mehrheit der Verbindungen innerhalb der diagonalen Scheiben.	29
Abbildung 3.12: Links: Die x-Achse dieses Diagramms zeigt die Shuttle-Flottengrößen. Die entsprechenden Werte der Abholwartezeit (pro Flottengröße) sind eingezeichnet (Mittelwert und Standardabweichung). Rechts: Die Anzahl der nicht bedienten Fahrten pro Flottengröße.	31
Abbildung 3.13: Die durchschnittliche Anzahl der Anfragen pro Tag, die die Shuttles in Abhängigkeit von der Flottengröße bedienen.	31
Abbildung 3.14: Der Fahrzeugbesetzungsgrad über den Tag (gemittelt über 5-Minuten-Zeitintervalle).	32

1 Einführung

Das Projekt APEROL steht für "Autonome, personalisierte Organisation des Straßenverkehrs und digitale Logistik" und widmet sich der Implementierung, Erprobung und Validierung eines ganzheitlichen Ansatzes für einen optimierten autonomen Verkehr mit Bereitstellung geeigneter Mobilitätsdienstleistungen. Die Dienste sind für den individuellen Personen- und Güterverkehr gedacht, unter Berücksichtigung individueller Bürgerbedürfnisse und Optimierungen im Hinblick auf die öffentliche Akzeptanz. Es werden zwei Hauptziele angestrebt, die direkt mit dem autonomen Verkehr korrespondieren. Das erste bezieht sich auf die Grundlagenforschung des autonomen Fahrens selbst. Zum Beispiel die Verarbeitung von Sensordaten, die Erkennung der Umgebung, die Interpretation von Situationen und die Strategien der autonomen Fahrmanöver. Das zweite Ziel umfasst die Entwicklung einer Cloud-Lösung mit einem kompletten und optimierten autonomen Verkehrssystem, das neue Kommunikationstechnologien integriert mit dem Management der autonomen Flotten (AMoD-Algorithmen) nutzt. Diese werden APEROL eine agentenbasierte Simulation des gesamten Verkehrs in der Stadt Aachen ermöglichen und ein Testbett für Flottenmanagement-Algorithmen und Optimierungsverfahren schaffen. Im Ergebnis können zukünftige Verkehrsszenarien mit unterschiedlichen Verteilungen der Verkehrsarten simuliert und auf Machbarkeit, Kosten und Übertragbarkeit auf andere Städte und Regionen analysiert werden.

In diesem APEROL Schlussbericht der MAT.TRAFFIC GmbH werden die erzielten Ergebnisse im Detail dargestellt, es wird der voraussichtliche Nutzen dieser Ergebnisse beschrieben, und es wird ausgeführt, welcher Fortschritt auf den entsprechenden wissenschaftlichen Feldern erzielt wurde.

Das herausragende, innovative Ergebnis von MAT.TRAFFIC im APEROL Projekt ist eine Verkehrssimulationsumgebung für einen autonomen Shuttle-Service IN DER Stadt Aachen, die auf dem modularen Open-Source-Framework MATSim der ETH Zürich. MATSim bietet Schnittstellen, die spezifische Erweiterungen des Systems ermöglichen; im Fall von APEROL zur Integration von autonomen Shuttles (AS), die über ein Mobility-on-Demand-Flottenmanagement gesteuert werden.

2 Aufgabe und Rahmenbedingungen

2.1 Aufgabenstellung

Die hauptsächlichen Aufgaben von MAT.TRAFFIC in APEROL waren, neben der Mitarbeit bei der Szenarienentwicklung (AP0) und der Anforderungsanalyse (AP1), (1) technische und verfahrenstechnische Unterstützung des innerstädtischen Testfelds in Zusammenarbeit mit der Stadt Aachen, und (2) die Entwicklung der Mobilitätsdienste, welche AMoD Algorithmen und Verkehrssimulationen umfasste.

Eine Übersicht über das Gesamtvorhaben sowie deren Meilensteine und Arbeitspakete kann der Gesamtvorhabensbeschreibung entnommen werden. Im Folgenden werden die Arbeitspunkte von MAT.TRAFFIC für die beiden Hauptarbeitspakete (AP2 und AP5) kurz umrissen.

AP2: Pilotbetrieb und Umsetzung

2.1: Ermittlung des Verkehrszustands:

Auf der Basis von verfügbarer Infrastruktur / Sensorik, Cloud-Datenbasen und fahrzeuggenerierter Daten soll für die betreffenden Stadtgebiete ein aktueller Verkehrszustand und dessen Kurzfristprognose in Form von Reisezeiten und Routenverteilungen bestimmt werden.

⇒ MAT.TRAFFIC hat (1) Verfahren entwickelt bzw. anpasst, die es erlauben, lokale Verkehrszustände etwa für signalisierte Kreuzungen oder Streckenabschnitte zu bestimmen, und (2) ein dynamisches makroskopisches Verkehrsmodell und Routenwahlverfahren bereitgestellt, anpasst und konfiguriert, mit dem die geforderten Verkehrszustandswerte und Routenverteilungen online für die betreffenden Stadtgebiete bestimmt werden können.

2.3: Hard-/Software-Schnittstelle zur Infrastruktur:

Unter Nutzung existierender bzw. neu entwickelter Schnittstellen wurden die APEROL-Cloud-Subsysteme an die verfügbare Aachener Verkehrsinfrastruktur angebunden. Dies ermöglicht, online Zustandsdaten der Verkehrsrechnerzentrale zu übernehmen und in APEROL spezifischen Algorithmen und Modellen zu verarbeiten.

⇒ MAT hat Schnittstellen zu den verfügbaren Infrastruktur- und Cloud-Datenbasen implementiert und integriert, und, zusammen mit Partnern, Verfahren entwickelt, um Daten von verschiedenen Quellen abzugleichen und zu validieren (Datenfusion).

AP5: Entwicklung der Mobilitätsdienste

5.1: Mathematische Optimierung und Data-Analytics:

Für die in AP0 definierten Logistik und Transportdienste müssen zunächst möglichst allgemeine Optimierungsprobleme formuliert werden, anschließend müssen die Teilprobleme identifiziert und schließlich geeignete Heuristiken ausgewählt und angepasst werden, die dann in einer umfassenden Simulation evaluiert werden können. Die Abweichung von den erreichten Optimierungszielen können wiederum als Trainingsdaten dienen, die ein Machine-Learning-Algorithmus nutzen konnte, um die Optimierungsverfahren kontinuierlich zu parametrisieren.

⇒ MAT.TRAFFIC hat in einem ersten Schritt dabei geholfen, die Optimierungsprobleme zu beschreiben, die die Transportdienstleistungen und das Flottenmanagement betreffen (etwa: Wie groß eine optimale Flottengröße wäre in Abhängigkeit von zu erbringenden Transportdiensten und maximalen Wartezeiten der Kunden? Welche Fahrzeuge welche Dienstleistungen erbringen (welche Kunden bedienen)? Mit welchen Strategien Leerfahrten bzw. Standzeiten minimiert werden können?). In einem zweiten Schritt hat MAT.TRAFFIC in Kooperation mit anderen Partnern geeignete Ansätze zur Lösung der Probleme ausgewählt, miteinander kombiniert, implementiert und wissenschaftlich untersucht

5.2: Simulation, Evaluierung und Übertragbarkeit

Die in AP5.1 entwickelten Algorithmen sollen in diesem AP in Simulationen evaluiert werden. In einem ersten Schritt soll hierfür ein Teilgebiet der Stadt Aachen modelliert und simuliert werden. Die Algorithmen aus AP5.1 für die Szenarien aus AP0 können dann vorab in dieser Simulation getestet werden. In einem zweiten Schritt soll die Übertragbarkeit auf andere Städte gezeigt werden.

⇒ MAT.TRAFFIC verantwortet den Aufbau und die Parametrierung einer Mikro-Simulationsumgebung mit angekoppelten Ampelsteuerverfahren. Es wurden Schnittstellen zur Simulationsumgebung entwickelt, mit deren Hilfe Bewegungsprofile und Routen von Einzelfahrzeugen während der Simulationsläufe beeinflusst werden konnten. Damit wurde es möglich, präzise das Verhalten der Fahrzeugflotten in der Simulation nachzubilden. Zudem hat MAT.TRAFFIC Verkehrs-Mikrosimulationen und eine Evaluierung der Tests durchführen.

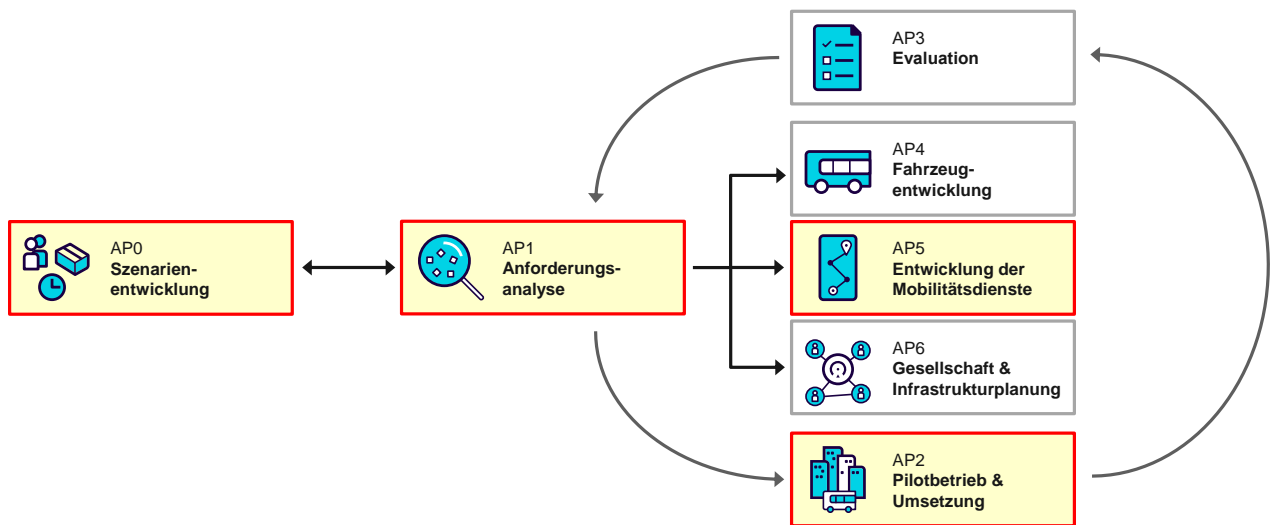


Abbildung 2.1: APEROL Projektstruktur. Die Hauptarbeitspakete von MAT.TRAFFIC sind farblich hervorgehoben.

2.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Firma MAT.TRAFFIC GmbH ist ein Aachener Technologieunternehmen (KMU) und steht für Forschung, Dienstleistungen und Produkte in den Bereichen Straßenverkehrs- und Kommunikationstechnik. Schwerpunkte sind Verfahren für die Modellierung und Steuerung von Verkehr.

Im Forschungsbereich liegen die Schwerpunkte von MAT.TRAFFIC bei der Steuerung und Modellierung von Verkehr sowie in der Systemintegration in Testfeldern. Dabei kann sie auf umfassende mathematische, systemanalytische und softwaretechnische Expertise, sowie auf weitgefächerte Erfahrungen aus der Verkehrs- und Datentechnik zurückgreifen. MAT.TRAFFIC hat in den letzten fünf Jahren als Konzeptersteller, Prototypentwickler und Systemintegrator maßgeblich Forschungsprojekte mitgestaltet, die sich schwerpunktmäßig mit Verkehrssteuerungen (meist im Rahmen von „Kooperativen Verkehrssystemen“) bzw. -simulationen beschäftigten.

Die europäischen und deutschen Forschungsprojekte im Einzelnen, an denen MAT.TRAFFIC als Projektpartner beteiligt war, um eigene Forschungsthemen voranzubringen und verwertbare Produkte bzw. Dienstleistungen vorzubereiten:

Projekt	Arbeiten und Expertisen
eCoMove	<ul style="list-style-type: none"> - Mikrosimulation von Kooperativen Verkehrssystemen unter dem Gesichtspunkt der CO2 Reduktion. - Dynamische Routenwahl und Verkehrsumlegung auf der Basis von fahrzeuggenerierten Daten.
COMPASS4D	<ul style="list-style-type: none"> - Implementierung von RSU Kommunikations-Middleware (CAM, DENM, TOPO, SLAM) und Kooperativen Services für städtische Kreuzungen. - Einrichtung und zweijähriger Betrieb eines Testfeldes mit mind. 20 Kreuzungen und einem Backoffice.

Projekt	Arbeiten und Expertisen
ECoMove	<ul style="list-style-type: none">- Modellierung und Simulation des Verkehrsnetzes der Stadt München- Bestimmung eines Systemoptimums zur Minimierung des Gesamtenergieverbrauchs im Netz
I2EASE	<ul style="list-style-type: none">- Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation und lokale Verkehrssteuerung zur Minimierung des Energieverbrauchs aller motorisierten Verkehrsteilnehmer- Situationsabhängige Priorisierung von E-Fahrzeugen im Bereich der signalisierten Kreuzung- Berücksichtigung der speziellen Anforderungen von automatisch fahrenden Fahrzeugen im Kreuzungsbereich

2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Planung und Ablauf des Vorhabens folgte der festgelegten Gesamtprojektplanung, so wie sie im Antrag festgelegt wurde.

2.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Projekt APEROL untersucht sowohl die praktischen Fähigkeiten autonomer Fahrzeuge als auch ihre Anwendung als zukünftiges Transportmittel, in großen städtischen Gebieten, im Rahmen eines volldynamischen, nachfragegesteuerten Busbetriebs (Autonomous transit on demand, ATOD). Bei der Bewertung der zu erwartenden Nutzerakzeptanz müssen Verfügbarkeit, Zeit, Zuverlässigkeit, Erreichbarkeit und Preis berücksichtigt werden, wobei die Möglichkeit besteht, diese Parameter zu variieren.

Autonome Fahrzeuge können in verschiedenen Modi betrieben werden, vom reinen Punkt-zu-Punkt-Verkehr mit einzelnen Passagieren, über die Bündelung von Anfragen mit ähnlichen Start- und Zielregionen (Shared Autonomous Vehicle, SAV), bis hin zu ATOD-Modellen.

Anhand von aufgezeichneten Taxifahrten in Manhattan wurde gezeigt, dass dynamische Fahrgemeinschaften die Gesamtzahl der gefahrenen Fahrzeugkilometer reduzieren können, wobei zu Spitzenzeiten auf fast 100 % aller Fahrten mehr als ein Fahrgast mitfährt. Diese Untersuchung basierte auf der Annahme, dass alle diese Fahrten als potenzielle Fahrgemeinschaften durchgeführt werden und dass keine Ersatzstrecken hinzukommen. Martinez und Viegas zeigen, dass eine Kombination aus SAV und ATOD den Transportbedarf einer Stadt wie Lissabon decken kann. Allerdings ersetzen sie den gesamten Individualverkehr.

Bischoff und Maciejewski simulieren den Ersatz des Individualverkehrs, im gesamten Stadtgebiet von Berlin, durch autonome Taxis unter Verwendung der in MATSim verfügbaren DVRP (Dynamic Vehicle Routing Problem) Erweiterung. Diese Simulation erfolgte auch ohne die Wahl des Verkehrsmittels, indem alle aktuellen IV-Nutzer als AV-Taxi-Nutzer betrachtet und alle anderen Nutzer und Verkehrsmittel aus dem Modell entfernt wurden. Unter diesen

Bedingungen scheint es möglich, die Fahrten von 1,1 Millionen IV-Nutzern mit 100.000 autonomen Taxis zu bewältigen.

Die Verkehrssimulation mit MATSim geht über das übliche Verfahren hinaus, bei dem das Verfahren als zusätzliches Verkehrsmittel innerhalb von MATSim abgebildet und implementiert wird. Stattdessen findet der Kern der Steuerung und Planung in einer, über geeignete Schnittstellen, angebundenen Mobilitätszentrale statt. Damit wandelt sich MATSim von einer reinen Simulationsumgebung zu einer Testumgebung für verkehrstechnische Verfahren. Verschiedene Mobilitätszentralen können unter konstanten Laborbedingungen in unterschiedlichen Szenarien verglichen werden.

Simulationen für größere Gebiete, wie die Stadt Aachen, erfordern gewisse Vereinfachungen. Zum Beispiel Begrenzung der Anzahl der Agenten durch Zufallsauswahl, reduzierte Anzahl der Fahrzeuge, entsprechend skalierte Linienkapazitäten etc. mit anschließender Hochrechnung auf die Summe.

Durch den Einsatz besonders leistungsfähiger Hardware und rechenintensiver Verfahrensschritte (insbesondere der Optimierungsalgorithmen der Mobilitätszentrale) ist es möglich, jeden Verkehrsteilnehmer und jedes Fahrzeug zu berücksichtigen. Damit kann auch die individuelle Wahl der Verkehrsmittel berücksichtigt werden, was Rückschlüsse auf die Gestaltung des als Fahrgemeinschaften organisierten Busbetriebs zulässt, was für eine größtmögliche Akzeptanz notwendig ist.

2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

MATSim (ETH Zürich):

MATSim bietet ein Framework zur Implementierung großer agentenbasierter Transport-Simulationen. Derzeit bietet MATSim ein Framework für Nachfragemodellierung, agentenbasierte Mobilitätssimulation (Verkehrsflusssimulation), Neuplanung, einen Controller zum iterativen Ausführen von Simulationen sowie Methoden zur Analyse der von den Modulen erzeugten Ausgabe. Anwender können das Basissystem. Das Framework besteht aus mehreren Modulen, die kombiniert oder eigenständig verwendet werden können. Module können durch eigene Implementierungen ersetzt werden, um einzelne Aspekte der eigenen Arbeit zu testen.

Die eigenen Implementierungen können dem allgemeinen Pool wieder verfügbar gemacht werden, so dass die Community davon profitiert. Es ist in naher Zukunft geplant, die in APEROL entwickelten, spezifischen Funktionen dem Pool der MATSim Erweiterungsmodule verfügbar zu machen.

TomTom Developer Portal:

In enger Zusammenarbeit mit der Stadt Aachen und TomTom wurde das TomTom Developer Portal für die Dauer des APEROL Projekts verfügbar gemacht. Über eine spezielle API wurde eine dynamische Live-Verkehrslage für ausgewählte Aachen-Straßen für Kalibrierungszwecke des eigenen Simulationsmodells übernommen.

3 Ergebnisse und Nutzen

3.1 Erzielte Ergebnisse

Die in diesem Kapitel aufgeführten und im Detail beschriebenen Ergebnisse beziehen sich auf die im letzten Kapitel aufgeführten Aufgaben. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die MAT.TRAFFIC Hauptthemen

- Pilotbetrieb und Umsetzung,
- Entwicklung der Mobilitätsdienste

detaillierter vorgestellt und zusammen mit den erzielten Ergebnissen vorgestellt.

3.1.1 Pilotbetrieb und Umsetzung

Ein wichtiger Teil der APEROL Forschung war der Pilotbetrieb in der Aachener Innenstadt, mit dem die wesentlichen Shuttle Dienstleistungen getestet und demonstriert wurden. Unter Nutzung existierender bzw. noch zu erstellender Schnittstellen sollten dafür die APEROL-Cloud-Subsysteme an die verfügbare Aachener Verkehrsinfrastruktur angebunden werden. Dies ermöglichte, Online-Zustandsdaten der Verkehrsrechnerzentrale zu übernehmen und in APEROL spezifischen Algorithmen und Modellen zu verarbeiten.

Das APEROL Testfeld Aachen Innenstadt ist in der Abbildung 3.1 weiter unten abgebildet. Die dort verwendeten Shuttle-Haltestellen stimmten größtenteils mit den bereits vorhandenen ASEAG-Haltestellen überein.

Um die für dieses Stadtgebiet existierenden dynamischen Verkehrsdaten nutzen zu können, musste das APEROL-Subsystem mit der städtischen Infrastruktur verbunden werden. MAT.TRAFFIC definierte und realisierte dazu die Schnittstellen zu den verfügbaren Infrastruktur- und Cloud-Datenbasen, um verkehrszustandsbezogene, dynamische Daten zu übernehmen. Weiter wurden Verfahren zusammen mit Partnern entwickelt, um die dynamischen Daten verschiedener Quellen abzugleichen und zu validieren (Datenfusion). Auf der Basis von verfügbarer Infrastruktur / Sensorik, Cloud-Datenbasen und fahrzeuggenerierter Daten wurde so über die Datenfusion für das betreffende Stadtgebiet der aktueller Verkehrszustand und dessen Kurzfristprognose in Form von Reisezeiten und Routenverteilungen bestimmt. Die Zustandsberechnungen wurden durchgeführt, indem (1) Verfahren entwickelt bzw. angepasst wurden, die es erlauben, lokale Verkehrszustände für signalisierte Kreuzungen oder Streckenabschnitte zu bestimmen, und (2) ein dynamisches makroskopisches Verkehrsmodell und Routenwahlverfahren angepasst und integriert wurde, mit dem die geforderten Verkehrszustandswerte und Routenverteilungen online für die betreffenden Stadtgebiete bestimmt werden konnten.

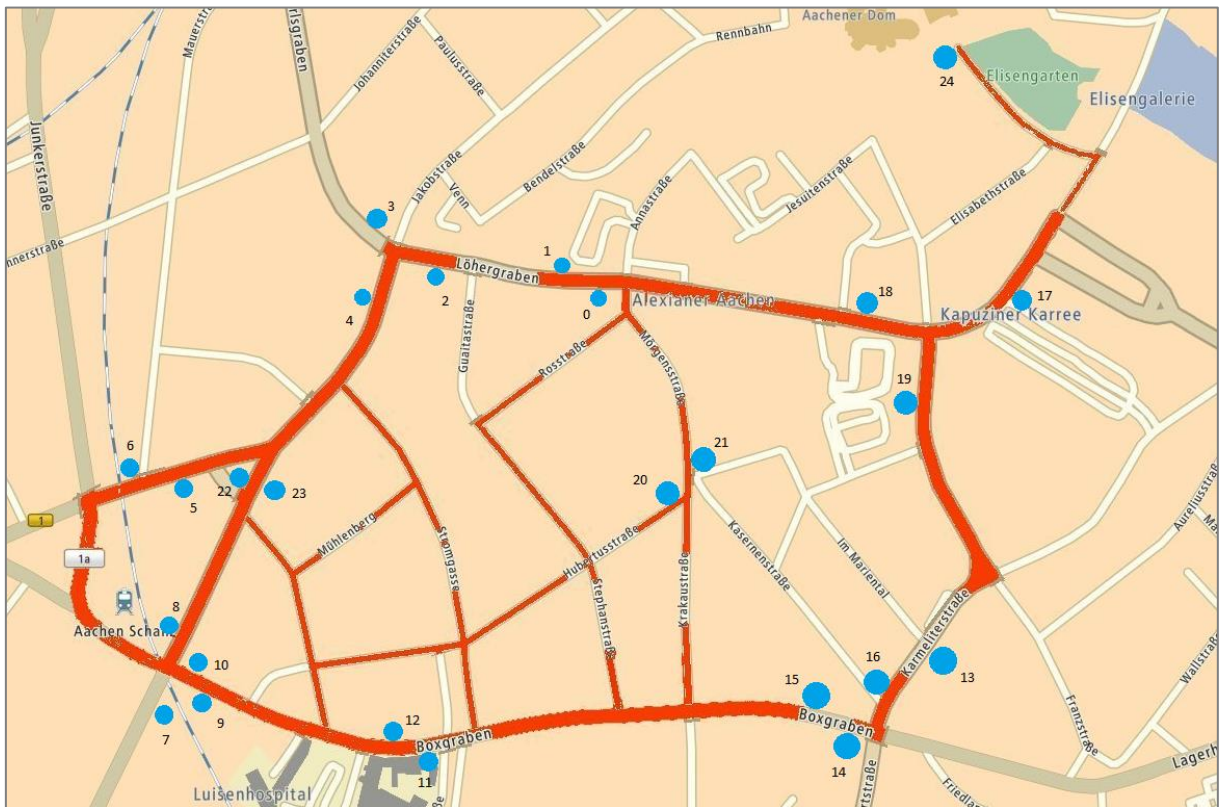


Abbildung 3.1: Das APEROL Testfeld Aachen Innenstadt mit den Shuttle-Haltestellen (blaue Punkte), die größtenteils mit den bereits vorhandenen ASEAG-Haltestellen übereinstimmen.

3.1.1.1 Verfahrensbeschreibung

Im Rahmen des Forschungsprojektes APEROL wurde für das Testfeld in der Aachener Innenstadt ein Live-Verkehrslageserver entwickelt. Dieser Server fusioniert dynamische Daten verschiedener Quellen. Die fusionierten Daten dienen als Input zu einer Verkehrslagebestimmung, die ein möglichst exaktes, dynamisches Bild der Verkehrssituation liefert. Diese Verkehrslage wurde von anderen Projektpartnern für Funktionalitäten des Flottenmanagements, wie intelligentes Routing autonomer Shuttles, verwendet.

Als Schnittstelle für die fusionierten Daten wurde eine bereits existierende Schnittstelle von TomTom („TomTom Traffic Incident Details API“), in leichter Abwandlung, verwendet, da die existierende Schnittstelle bereits in das Programm der Projektpartner eingebunden war und so wenige Änderungen im Code der Projektpartner vorgenommen werden mussten.

Es wurden weitere interne Schnittstellen für Rohdatenausgabe, Modifizierung der fusionierten Daten und Datenempfang implementiert, deren Verwendung weiter unten erläutert wird.

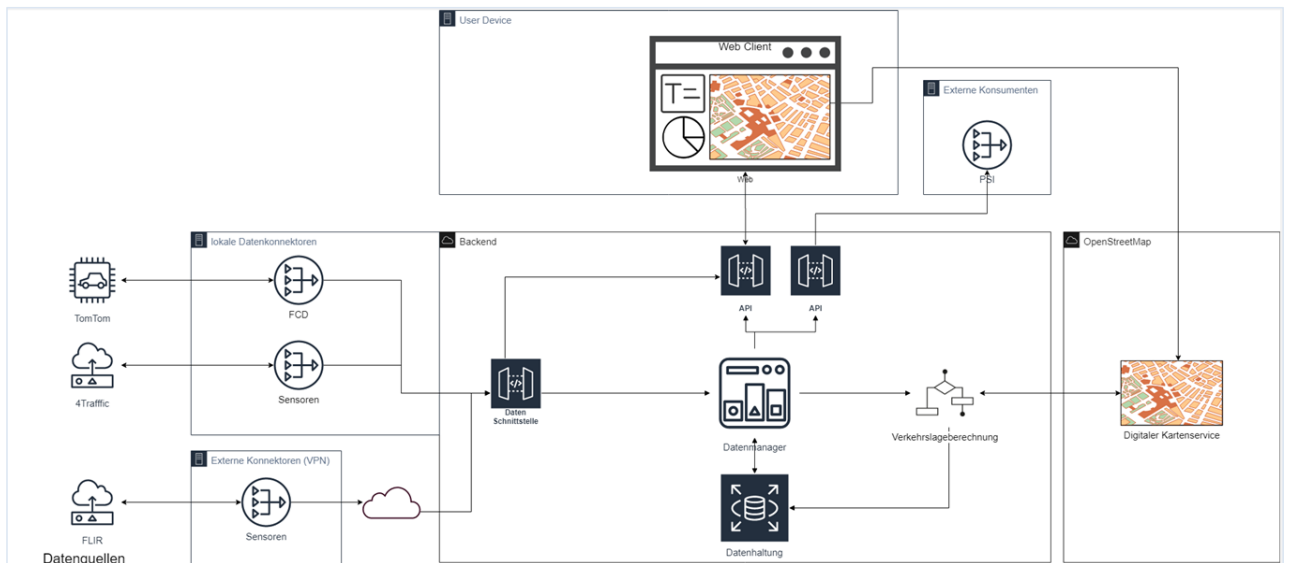


Abbildung 3.2: Systemüberblick Testfeld Aachen Innenstadt. Das System umfasst, neben der eigentlichen Verkehrslageberechnung, Schnittstellen zu den dynamischen Daten der Verkehrsinfrastruktur und eine Visualisierungsoberfläche.

3.1.1.2 Datenquellen

Die Datenquellen sind sowohl die TomTom Traffic API als auch von der Stadt Aachen installierte Verkehrsdetektoren von „THERMICAM2“ (Teledyne FLIR) und dem Aachener Verkehrsunternehmen „4traffic“.

Um die für die Fusion benötigten Daten zu beschaffen, wurden drei voneinander und vom Server unabhängige Dienste implementiert, die jeweils für eine Datenquelle zuständig sind. Die Datenquellen werden dabei in einer konfigurierbaren Frequenz abgefragt, fusioniert und über eine interne Schnittstelle „Datenempfang“ an den Server geliefert. Für die Datenbeschaffung aus den Detektoren müssen die anfragenden Dienste außerdem eine permanente VPN Verbindung aufbauen, da die Detektoren ansonsten nicht erreichbar sind. Empfängt der Server für ein Zeitintervall Daten aus den Datenquellen, so sichert er zunächst die Rohdaten, fusioniert diese und sichert das Ergebnis, sodass die Fusion für jedes Zeitintervall nur einmalig durchgeführt werden muss.

Die Datenquellen liefern folgende Werte:

1. TomTom: Reisezeit für einen Polygonzug
2. THERMICAM2: Reisezeit auf einer kurzen Strecke
3. 4traffic: Anzahl Fahrzeuge auf einer kurzen Strecke

3.1.1.3 Fusion

Der Datenfusionsprozess startet mit einer Verifikation und gegebenenfalls Korrektur bzw. Anpassung der Eingangsdaten (z.B. TomTom Daten). Im zweiten Schritt der Fusion werden

die TomTom Polygonzüge mit den Detektor Strecken abgeglichen bzw. geschnitten. Dies ist notwendig, um einen Bezug zwischen TomTom Polygonzug und den Detektorstrecken herstellen zu können. Der Schnitt eines Polygonzugs und die Fusion wird anhand des folgenden Beispiels verdeutlicht.

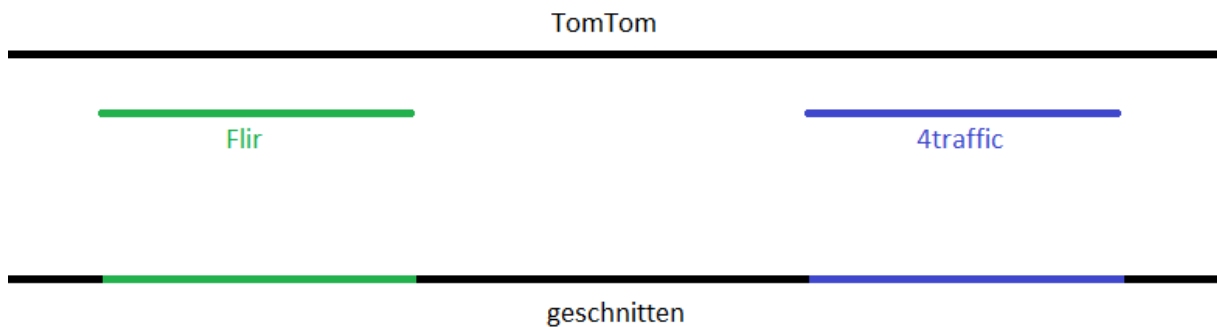


Abbildung 3.3: Der Schnitt eines Polygonzugs und die Datenfusion.

Im dritten Schritt der Fusion wird anhand der Reisezeit des THERMICAM2 Abschnitts und der Anzahl Fahrzeuge auf dem 4traffic Abschnitt eine Verifikation für den gesamten TomTom Polygonzug durchgeführt.

Für diese Verifikation wird ein Intervall berechnet in welchem die Reisezeit auf dem Gesamtstück, laut Detektordaten, mit einer hohen Wahrscheinlichkeit liegt. Liegen, wie im obigen Beispiel mehrere Detektoren für einen TomTom Polygonzug vor, werden die Reisezeitintervalle der Detektoren vereinigt.

Das entstandene Reisezeitintervall wird dann mit der TomTom Reisezeit abgeglichen. Liegt der TomTom Wert im Intervall, so ist die Verifikation erfolgreich und der TomTom Wert für die Reisezeit wird verwendet. Liegt der TomTom Wert außerhalb des Intervalls ist die Verifikation nicht erfolgreich und der Wert wird er auf die nähere Intervallgrenze angepasst.

3.1.1.4 Modifizierung der Werte

Für Tests mit dem Routing der Projektpartner wurde eine Schnittstelle „Modifizierung der fusionierten Daten“ eingerichtet, um die Reisezeitdaten im Server händisch anpassen zu können. Mithilfe dieser Schnittstelle können einzelne Testfälle, wie zum Beispiel plötzlicher starker Stau oder Vollsperrung aufgrund einer Baustelle, modelliert und mit dem Routingalgorithmus der Projektpartner simuliert und getestet werden.

3.1.1.5 Visualisierung der Werte

Zur Visualisierung der Daten wurde ein Browser Frontend entwickelt, welches regelmäßig sowohl die Rohdaten als auch die fusionierten Daten vom Server anfragen kann (über die Schnittstellen „Rohdatenausgabe“) und diese auf einer OSM Karte darstellt.

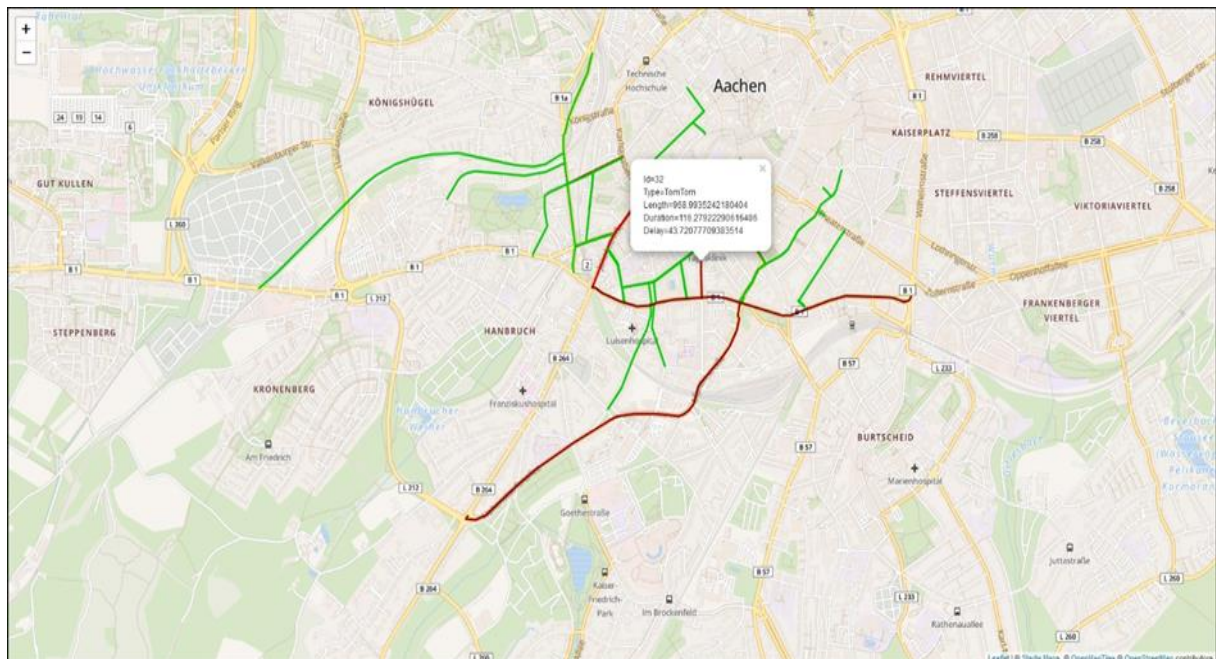


Abbildung 3.4: Die Online-Visualisierung des APEROL Testfeldes in Aachen mit verschiedenen Farben für unterschiedliche Reisezeiten.

3.1.2 Entwicklung der Mobilitätsdienste

Innerhalb des Arbeitspakets AP5 „Entwicklung der Mobilitätsdienste“ hat sich MAT.TRAFFIC auf die folgenden Themen konzentriert:

- Flottenmanagement für autonome Shuttle-Flotten
- Stadtweite Verkehrssimulation mit Anbindung einer Mobilitätszentrale

Das APEROL-Simulationssystem soll die reale Welt aktuell abbilden, wobei zum einen alle relevanten Merkmale und Dynamiken adressiert werden, zum anderen die APEROL-Kerndienste rund um die Mobilität unverändert bleiben.

3.1.2.1 Systemüberblick mit APEROL Simulation

Hinsichtlich der Funktionalität ist das Gesamtsystem in zwei Hauptblöcke unterteilt: (1) die APEROL Simulation (MATSim) und (2) die APEROL Mobilitätszentrale. Darüber hinaus soll auch auf die verschiedenen MATSim-Erweiterungen eingegangen werden, die notwendig waren, um alle Anforderungen der APEROL-Dienste (z.B. AMoD-Shuttles) zu adressieren.

Das APEROL-Gesamtsystem, das auf einer Verkehrssimulationsumgebung basiert, soll die reale Welt aktuell abbilden (alle relevanten Merkmale und Dynamiken werden angesprochen) und die APEROL-Kerndienste rund um die Mobilität sollen unverändert bleiben. Das System besteht aus zwei Subsystemen (siehe auch Abbildung unten):

1. APEROL-Simulation

Die Simulation ersetzt das tatsächliche System mit dem Verkehrssystem, den Verkehrsteilnehmern und den verschiedenen Fahrzeugtypen (Verkehrsträgern). Die Simulation wird mit MATSim realisiert, einem aktivitätsbasierten, erweiterbaren Multiagentensimulations-Framework, das in Java implementiert und als Open Source verfügbar ist.

2. APEROL Mobilitätszentrale

Das Mobility Center umfasst hauptsächlich den Buchungsprozess und das Shuttle-Flottenmanagement. Die Zentrale ist eine vereinfachte Version einer tatsächlichen Mobilitätszentrale, die auf dem realen Testgelände von APEROL eingesetzt wird. Sie ist daher als Container der für die Dynamik der autonomen Shuttle-Flotte relevanten Kerndienstfunktionalität innerhalb des Verkehrssimulationsteils zu betrachten.

Was die AMoD-Shuttles betrifft, so interagieren die beiden Subsysteme durch periodischen Datenaustausch. Dies liegt daran, dass das Flottenmanagement der Shuttles im APEROL Mobility Center angesiedelt ist. Der Datenaustausch wird über mehrere Schnittstellen abgewickelt, die implementiert wurden. Diese Schnittstellen sind vereinfachte Versionen der APEROL-Schnittstellen im realen Testgelände.

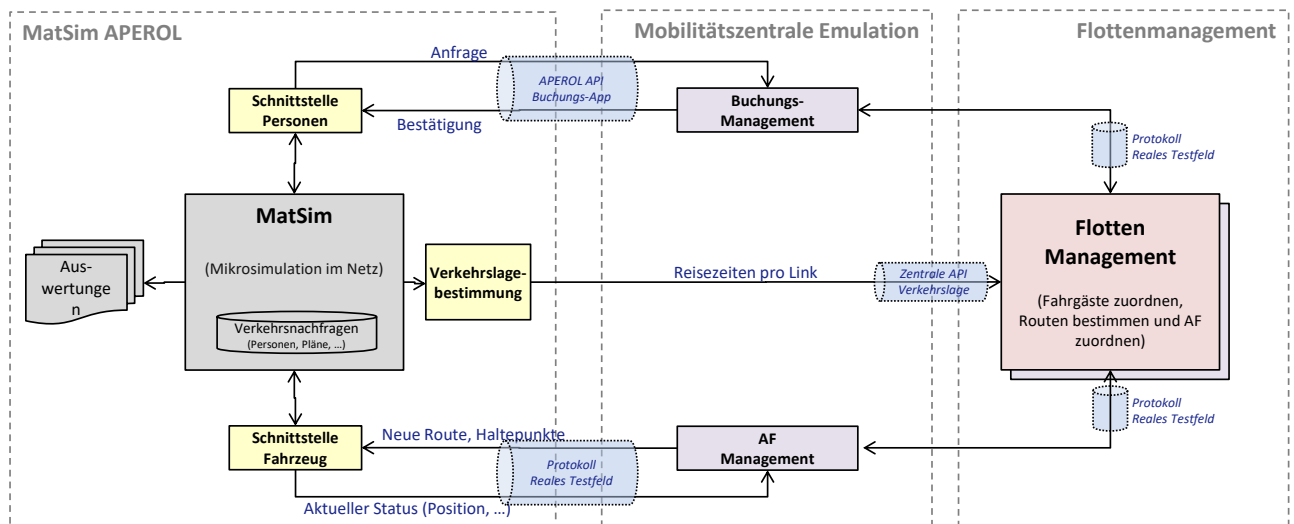


Abbildung 3.5: Systemübersicht APEROL: Simulation mit emulierter Flottenmanagementzentrale.

3.1.2.2 Subsystem Verkehrssimulation

Bisher sind reale autonome Shuttle-Flotten in relevanter Größe nicht verfügbar. Um die Dynamik und ihre Integration in den konventionellen Verkehr sowie leistungsbezogene Fragestellungen zu untersuchen, wurde daher ein groß angelegtes APEROL-Simulationsteilsystem eingesetzt. Dieser Simulationsteil modelliert das tatsächliche Verkehrssystem, die Verkehrsteilnehmer und die verschiedenen Verkehrsträger. Er wird durch

MATSim realisiert, einem aktivitätsbasierten, erweiterbaren Multi-Agenten-Simulations-Framework.

Die Verkehrssimulationen in APEROL basieren auf dem modularen Open-Source-Framework MATSim der ETH Zürich. MATSim ist ein Open-Source-Verkehrssimulations-Framework, das groß angelegte agentenbasierte Simulationen ermöglicht, wobei Agenten die mobilitätsbezogenen Aktivitäten realer Personen in einem Straßenverkehrssystem darstellen. Dazu besitzen alle Agenten einen Tagesplan mit beabsichtigten Aktivitäten, die zu einer bestimmten Tageszeit beginnen, eine definierte Dauer haben und verschiedenen Verkehrsträgern zugeordnet sind. Die Aktivitäten finden an unterschiedlichen Orten im Verkehrsnetz statt, und folglich bewegen sich die Agenten durch das Netz, indem sie ihren Aktivitäten folgen. Das MATSim-Simulationsframework besteht aus Funktionsblöcken, die kombiniert oder eigenständig verwendet werden können. Vor allem aber können solche Module durch eigene Implementierungen erweitert oder ersetzt werden, um die Simulation an projektspezifische Anforderungen anzupassen. Die herausragende Herausforderung bei der Verkehrssimulation dieser Flotten ist die Performance, insbesondere bei großen Verkehrsnetzen mit zahlreichen autonomen Shuttles.

Im Rahmen dieser Forschung soll eine Transportart der Einsatz von autonomen Shuttles auf Abruf sein. Diese Shuttles haben sehr spezielle Anforderungen, da ihre Routen und Haltestellen von einer externen Mobilitätszentrale gesteuert werden müssen. Außerdem sollen solche Shuttles periodisch Statusdaten an die Zentrale senden. Für all dies wurde das MATSim-Simulationsframework um so genannte AMoD-Shuttles erweitert, die das Verkehrsnetz ebenfalls bevölkern können. Jeder AMoD-Shuttle hat einen internen Fahrplan für die nahe Zukunft. Dieser Fahrplan kann immer dann geändert werden, wenn ein neuer Reisebedarf auftritt, der von diesem Shuttle bedient werden könnte.

3.1.2.3 Subsystem Flottenmanagement

Das Flottenmanagement ist im Simulationskontext ein Synonym für das AMoD-Management (AMoD = Autonomous Mobility on Demand) für autonome Shuttles. Solche AMoD-Dienste sind darauf ausgelegt, dynamisch die optimale Strategie zu formulieren, um alle Fahrtwünsche innerhalb eines Straßennetzes im Laufe eines Tages zu bedienen. Die Optimalität hängt von einer gegebenen Zielfunktion ab, die multikriteriell sein kann. Das liegt daran, dass es mindestens zwei Perspektiven gibt, die zumindest teilweise in Konflikt zueinanderstehen können. Die erste ist die Perspektive der Kunden, die minimale Warte- und Reisezeiten anstreben könnten. Dies ist gewissermaßen die egoistische Perspektive. Demgegenüber steht das Interesse des Systembetreibers, dessen Ziel es ist, ein vernünftiges Geschäftsmodell aufrechtzuerhalten und die Betriebskosten zu minimieren (Anzahl der Shuttles, gefahrene Kilometer, Wartungskosten usw.). Letztendlich könnten die konkurrierenden Ziele in einer Art Gleichgewicht enden, in dem die Interessen ausgeglichen sind.

Um alle relevanten Aspekte des Betriebs in großem Umfang abzudecken, sind die entsprechenden Optimierungsprobleme sehr anspruchsvoll. Sie sind analytisch nur schwer zu

lösen, da z. B. die Shuttle-Client-Zuordnung als ganzzahlige lineare Programmierung betrachtet werden muss, die bekanntermaßen NP-komplett ist.

In APEROL soll das großräumige Mobilitätsszenario von Aachen, einer mittelgroßen Stadt mit mehr als einer Million Fahrtwünschen pro Tag, untersucht werden. Die Leistungsanforderungen haben zu den Vereinfachungen geführt: (1) jeder Shuttle bietet seinen Service individuell, als Antwort auf Kundenanfragen, an, wobei das Flottenmanagement die beste Passung auswählt, (2) die Shuttle-Kunden-Zuordnung hängt von der räumlichen Nähe ab und (3) es sind keine Transfervorgänge zwischen Shuttles erlaubt.

Abgesehen von diesen Vereinfachungen ist der in der APEROL-Simulationsumgebung verwendete AMoD-Betrieb durch gekennzeichnet:

- Die in Betrieb befindlichen Shuttles haben zwei Größen zu gleichen Teilen: 7 Sitzplätze und 15 Sitzplätze.
- Die Transportanforderungen werden von den Kunden (Agenten) zufällig zwischen 5 und 30 Minuten vor der Abholzeit gesendet.
- Es gibt einen definierten Fahrzeittoleranzwert rt ($0 < rt$) als Einschränkung für die Shuttles, ihre bestehenden Routen zu ändern. Für jeden Kunden c , der in ein Shuttle einsteigt, wird eine initiale Fahrzeit tt_c^0 auf der Basis seiner Route und der aktuellen Link-Reisezeiten ermittelt. Um weitere Kunden aufzunehmen, darf der Shuttle seine aktuelle Route nur dann ändern, wenn Folgendes gilt: $tt_c^0(1 + rt) \geq tt_c^{neu}$, für alle Kunden c im Shuttle.
- Der Kunde (Agent) wartet auf den zugewiesenen Shuttle und wird keinen anderen Shuttle betreten.
- Gruppenbuchungen sind möglich. Buchungen von Gruppen von mehreren Fahrgästen mit gleichem Start- und Zielort sind möglich.
- Eine durchgeführte Buchung ist fix. Eine nachträgliche Umdisponierung von Kunden auf einen anderen Shuttle vor der Abholung ist nicht möglich.

Das AMoD-Verfahren besteht aus drei algorithmischen Teilen: (1) Shuttle-Client-Zuweisung, (2) Routing und (3) Rebalancing.

Shuttle-Mandanten-Zuordnung:

Die Shuttle-Client-Zuordnung ist die Aufgabe, mehrere Anfragen dynamisch mehreren Shuttles einer bestimmten Kapazität zuzuordnen, indem die aktuellen Fahrpläne / Routen der Shuttles berücksichtigt werden. Jede Fahrtanfrage besteht aus dem Zeitpunkt der Anfrage, einer Abholzeit, Abhol- und Absetzort. Die Zuweisungsstrategie ist verteilt: Jedes Shuttle (in einer bestimmten Entfernung zu den Abholorten) prüft, ob es möglich ist, eine oder mehrere der neuen Anfragen in seinen aktuellen Fahrplan aufzunehmen, ohne die Fahrzeittoleranzen

der Fahrgäste an Bord zu verletzen. Wenn dies bejaht wird, sendet der Shuttle sein Angebot an einen zentralen Disponenten. Es werden aber nur die Shuttles angefragt, die freie Kapazitäten haben und sich zur Abholzeit in einer bestimmten Entfernung von den Abholorten befinden werden. Der Disponent erhält alle Shuttle-Angebote und nimmt diejenigen an, die in eine vorgegebene Bilanzstrategie der Zuweisungen passen.

Der Zuweisungsalgorithmus auf der Dispatcher-Ebene - der jede Simulationssekunde durchgeführt wird - wird wie folgt beschrieben:

1. Sammeln Sie alle neuen Reiseanfragen von Kunden.
2. Abfrage einer ausgewählten Menge von Shuttles, um deren Verfügbarkeit zur Bedienung der Anfragen zu prüfen.
3. Sammeln Sie die Shuttle-Angebote.
4. Bestimmen Sie die anzunehmenden Angebote in Übereinstimmung mit der gegebenen Ausgleichsstrategie.
5. Weisen Sie die betroffenen Shuttles an, ihre Fahrpläne entsprechend zu aktualisieren.

Auf der Shuttle-Ebene kann der Algorithmus wie folgt beschrieben werden:

1. Empfangen Sie die neuen Fahrplananfragen von Kunden, die sich innerhalb einer bestimmten Entfernung von der aktuellen Position des Shuttles befinden.
2. Prüfen Sie, ob es eine Teilmenge von Anfragen gibt, die bedient werden kann, indem Sie alle möglichen Umleitungen der aktuellen Route ermitteln, die mit den Reisezeitrahmen-Toleranzen aller Fahrgäste übereinstimmen.
3. Formalisieren Sie alle identifizierten Anfrage-Teilmengen, die bedient werden können, zusammen mit ihrer Routenänderung.
4. Senden Sie die Ergebnisse an den Dispatcher.

Schließlich wird darauf hingewiesen, dass die gesamte Shuttle-Client-Zuordnungsberechnung ein paralleles Schema ist. Es ist in hohem Maße skalierbar, da es auf einer beliebigen Anzahl von Prozessorkernen laufen kann. Die PC-Hardware der APEROL-Simulationsumgebung besteht aus 64 Kernen.

Routing:

Das Shuttle-Routing wird innerhalb des AMoD-Algorithmus ausgiebig genutzt, um die optimale Shuttle-Client-Zuordnung vorzunehmen und die aktuellen Shuttle-Schemata zu aktualisieren. Daher basiert es auf vorberechneten optimalen Routenbäumen für das gesamte Netzwerk, die auf den aktuellen Link-Reisezeiten beruhen. Es werden zwei verschiedene Arten von Bäumen berechnet: (1) alle Routen, die von einem beliebigen Netzwerkknoten zu einem festen Knoten führen, und (2) alle Routen, die von einem festen Knoten zu einem beliebigen anderen Netzwerkknoten führen. Wenn sich die Reisezeiten der Verbindungen infolge geänderter Verkehrszustände signifikant ändern, werden die entsprechenden Routenbäume aktualisiert.

Der Ansatz, die Routen in einer vorberechneten Datenbank nachzuschlagen, verbessert die Performance des AMoD-Routings drastisch.

Rebalancing:

Der Teil des Rebalancing-Verfahrens ist die Behandlung von ungenutzten Shuttles (ohne Fahrgäste). Ein herausragendes Ziel ist die Servicequalität, d. h. die Minimierung der durchschnittlichen Abholwartezeit für Kunden. Dies wird erreicht, indem ungenutzte Shuttles Bereiche anfahren, in denen zukünftige Anfragen erwartet werden. Das zweite Ziel ist die Minimierung der Betriebskosten, was durch die Minimierung der Anzahl der Shuttles, die Ausgleichsfahrten durchführen, angegangen wird.

Die implementierte Rebalancing-Lösung im APEROL-Simulationskontext folgt einem Gravitationsansatz, der auf historischen Verkehrsnachfrageschemata für den Tag basiert. Anhand dieser Schemata sind die Gebiete bekannt, aus denen bald Anfragen kommen werden, und ungenutzte Shuttles, ohne Fahrgäste, sollten diese Gebiete anfahren, um kurzfristig verfügbar zu sein. Je größer die Verkehrsnachfrage aus einem bestimmten Gebiet ist, desto stärker ist die Anziehungskraft auf die Leerlauf-Shuttles. Die Metrik, mit der die Gravitationswirkung auf ein Shuttle berechnet wird, ist seine Fahrzeit auf der kürzesten Route zum Verkehrsnachfragegebiet. Um die Zuordnung der ungenutzten Shuttles zu den Gravitationszentren gerechter und ausgewogener zu gestalten, wird ein spezielles, massiv paralleles, neuronales Netzwerkmodell verwendet, das von Teuve Kohonen erfunden wurde und als "self-organizing topological feature map" bekannt ist. Hier ist die Erregungsantwort des Lernschritts funktional mit der Gravitationskraft verbunden. Das Neuronale Netzwerk ist ein skalierbares, verteiltes Berechnungsschema, das auf vielen Recheneinheiten parallel laufen kann (ca. 9.000 CUDA-Kerne auf 2 Grafikkarten).

3.1.2.4 MATSim Konfiguration

Neben den zu untersuchenden konkreten Simulationsszenarien ist eine stadtspezifische Konfiguration und Kalibrierung notwendig. Dies bezieht sich auf den Gesamtumfang der Simulation, die beispielhafte tägliche Verkehrsnachfrage, die Rolle und Planung des ÖPNV, die Definition von Servicepunkten und die spezielle Behandlung von signalisierten Kreuzungen. Da es nicht möglich ist, die volle Komplexität des realen Straßenverkehrssystems zu modellieren, müssen auch einige Vereinfachungen eingeführt werden.

Umfang des Simulationsszenarios:

Die MATSim-Simulation umfasst die gesamte Stadt Aachen (Deutschland). Die Anzahl der im Aachener Szenario verwendeten Agenten beträgt etwa 350.000. Sie führen über den Tag verteilt etwa 750.000 Fahrten in verschiedenen Verkehrsmitteln durch. Der Anspruch (das Ziel?) ist es, die komplette Verkehrssituation während des Tages zu simulieren, ohne dass es zu einer Verkleinerung der Agenten und Straßenkapazitäten kommt.

Das MATSim-Netzwerk wurde unter Verwendung von Open Street Map-Daten generiert. Es besteht aus etwa 136.260 gerichteten Verbindungen und 69.814 Knoten. Zu den Hauptkriterien für die räumliche Definition des gesamten Simulationsgebiets gehörten: (1) die verfügbaren Verkehrsnachfragedaten des privaten und öffentlichen Verkehrs, (2) ein klarer Grenzschnitt mit Arterien und Autobahnen, (3) die Einbeziehung aller ÖPNV-Strecken und (4) generell die Abdeckung der Hauptverkehrswege und der Verkehrsdynamik in Aachen. Aus Leistungsgründen enthält das Netz nicht jede einzelne kleine Straße. Außerdem sind diese Straßen für die Verkehrssimulation nicht notwendig, um die relevanten Effekte der Verkehrsdynamik realistisch abzubilden. Daher werden bei der Generierung des Simulationsnetzes alle Straßenkategorien ignoriert, auf denen nicht mindestens Autos, öffentliche Verkehrsmittel oder Taxis fahren.

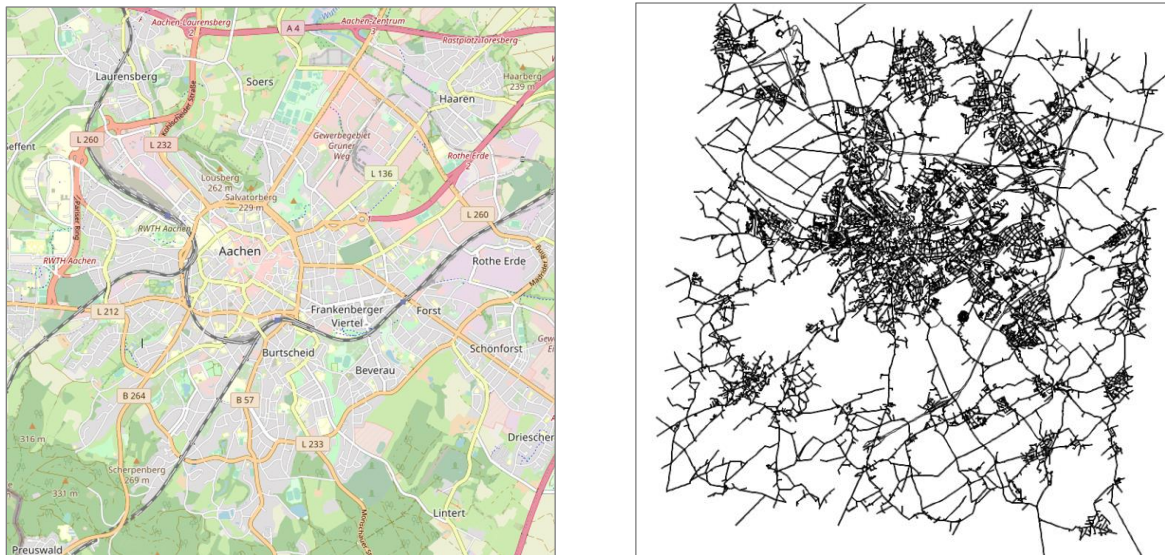


Abbildung 3.6: Das Aachener Straßennetz (links) und das generiertes Simulationsnetzwerk (rechts).

Verkehrsnachfrage und Agentenpläne:

In MATSim repräsentiert die Menge der Agenten zusammen mit ihren Tagesplänen den täglichen Verkehrsbedarf der realen Bevölkerung der Stadt. Die dynamische Verkehrsnachfrage, ausgedrückt durch Ursprung-Ziel-Relationen, ist bis zu einem gewissen Grad äquivalent zu diesen Agentenplänen. Mit anderen Worten, es ist möglich, die Agentenpläne direkt aus den Ursprung-Ziel-Matrizen (die die Anzahl der Fahrten von den Ursprüngen zu den Zielen pro Zeitfenster enthalten) abzuleiten. Es ist jedoch zu beachten, dass die Agentenpläne nicht notwendigerweise die Zuordnung von Agenten zu Verkehrsmitteln definieren müssen.

Der Schwerpunkt der APEROL-Simulation liegt auf der dynamischen Verkehrsnachfrage im normalen Werktagsverkehr ohne besondere Ereignisse (Sport, Feiertage, etc.), da diese die Szenarien beeinflussen könnten. Die Stadt Aachen hat dem Forschungsprojekt

freundlicherweise Daten des Individualverkehrs und des öffentlichen Verkehrs (vor allem Buslinien) zur Verfügung gestellt. Die Daten liegen in Form von Quelle-Ziel-Matrizen vor, in denen die Verkehrsströme von jeder Quelle zu jedem Ziel im Netz definiert sind (mit der Einheit Fahrzeuge pro Stunde). In Aachen sind die Verkehrsflussinformationen der Matrix noch detaillierter, da sie nach den Reisezwecken (Wohnen, Arbeiten, Schule, Universität, Dienstleistungen, Einkaufen, Freizeit, ...) aufgeschlüsselt und für den ganzen Tag aufsummiert werden. Sie sind nicht zeitlich aufgelöst in Form von Werten pro Zeitfenster (z.B. für jede Stunde), was für eine realistische Simulation der Verkehrsdynamik über den Tag notwendig ist. Vielmehr liefert die Stadtverwaltung sogenannte "Pegelinformationen pro Fahrtzweck", die eigentlich die zeitliche Verteilung der Fahrtzwecke bzw. Tätigkeitsarten über den Tag darstellen. Die benötigten zeitlich aufgelösten Verkehrsnachfrageinformationen wurden durch Kombination und Verarbeitung der Daten aus diesen beiden Quellen abgeleitet.

Zur Vereinfachung wurde, nachdem alle Fahrten (von einer beliebigen Startzone zu einer beliebigen Zielzone) einer Netzverbindung zugeordnet wurden, jeder Zone eine gleiche Verteilung von Zonenverbindungen zugewiesen. Folglich hat jeder Reisende einen definierten Start- und Zielort. Während der Simulation ist es dann für die Agenten (Reisenden) einfach, den nächstgelegenen Servicepunkt anzufahren oder zu dem Servicepunkt zu fahren, der seiner Zielverbindung am nächsten liegt.

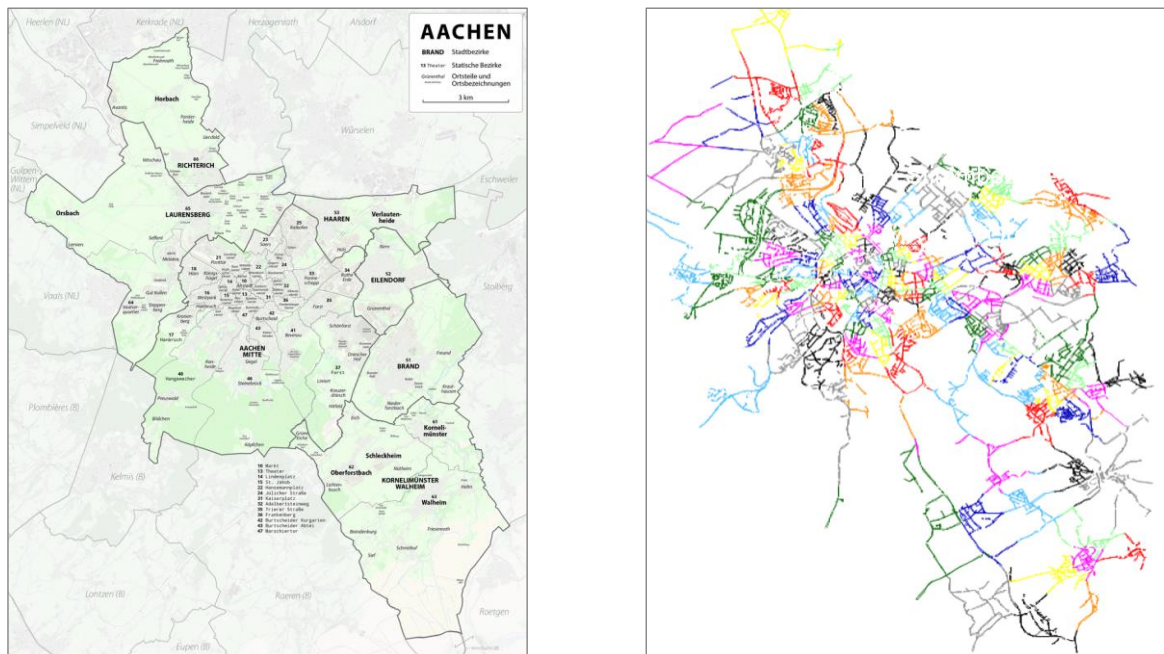


Abbildung 3.7: Verkehrsdaten aus der Stadt Aachen: Die Stimmbezirke der Stadt, die als Herkunfts-Ziel-Zonen für die Verkehrsnachfrage herangezogen werden (links). Und die entsprechenden Teile des Simulationsnetzes (rechts).

Für den ÖPNV ist zu erwähnen, dass die entsprechende Verkehrsnachfrage nicht von Haltestelle zu Haltestelle definiert ist, sondern ähnlich wie beim Individualverkehr paarweise zugeordnet wird. Es wird davon ausgegangen, dass alle Fahrgäste des ÖPNV zur nächstgelegenen Bushaltestelle laufen, um ihre Fahrt zu beginnen.

Öffentliche Verkehrsmittel:

In Aachen basiert der gesamte öffentliche Nahverkehr auf Bussen, von denen viele Doppelgelenkbusse sind. Alle diese Busse sind nach festen Linien, Routen und Fahrplänen organisiert. Das Streckennetz der Buslinien ist dicht, wie in der Abbildung unten dargestellt.

Etwa 13 % aller Fahrten werden in Aachen mit öffentlichen Verkehrsmitteln zurückgelegt. Es gibt viele Optimierungsmöglichkeiten im aktuellen System, da die Leistung begrenzt ist, die Taktdichte unzureichend sein kann und die Fahrzeiten vom Stadtrand zu bestimmten Abschnitten des Stadtzentrums zu lang sind. Einige der später vorgestellten Simulationsszenarien befassen sich mit anderen - flexibleren - ÖPNV-Szenarien (mit kleineren Bussen, höherer Frequenz oder bedarfsgesteuerten Routen).

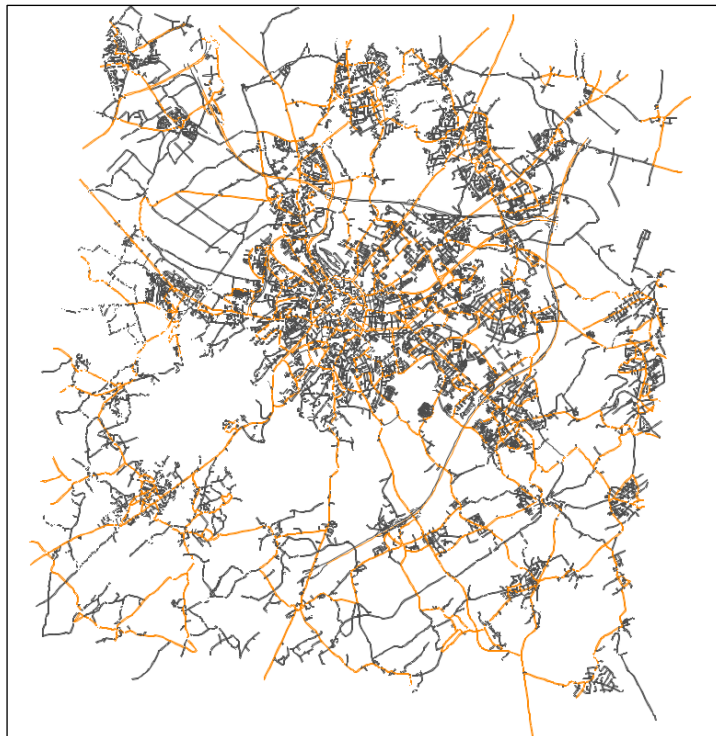


Abbildung 3.8: Die Buslinien in Aachen.

Signalisierte Kreuzungen:

Aachen hat etwa 160 signalisierte Kreuzungen (Ampeln). Die APEROL MATSim-Simulation berücksichtigt etwa 140 (siehe Abbildung unten).



Abbildung 3.9: Positionen der 140 signalisierten Knotenpunkte in der Aachener Stadtsimulation.

Abhängig vom durchschnittlichen Grünsplit des Lichtsignalsteuerungsprogramms variieren die Kapazitäten der Zufahrtsstrecken entsprechend. Die Kapazität einer Straße wird in Fahrzeugen pro Stunde gemessen. Die Kapazität hat einen großen Einfluss auf die Verkehrsdynamik in der Umgebung der Kreuzung. Wenn sich die Sättigung der Kapazität nähert (bei starkem Verkehr), kommt es aufgrund der Kapazitätsbegrenzungsfunktion zu Warteschlangen an Haltelinien und längeren Wartezeiten für die Verkehrsteilnehmer. In der APEROL MATSim-Simulation werden (1) die Reisezeiten definitiv ausgewertet, um ein geeigneteres Konfigurationsmuster für die nächste Iteration zu finden, und (2) das Routing, als wesentlicher Teil des Flottenmanagements, basiert auf Verbindungszuständen (Reisezeiten).

Die Ampelsteuerung in Aachen ist größtenteils eine Festzeitsteuerung, mit einigen Ausnahmen, wie z. B. einfache Übersteuerungsmechanismen für die Busnachfrage, die als Priorisierung des öffentlichen Verkehrs betrachtet werden können. Diese Daten der Festzeitsteuerung wurden verwendet, um die Kapazitätswerte der entsprechenden Netzverbindungen abzuleiten (wie "Kapazität = Grün-Split * Sättigungsfluss"). In gewisser Weise sind solche Kapazitäten gemittelte Werte. Da die MATSim-Simulation aber auf einem relativ hohen Niveau makroskopisch ist, besteht kein Interesse an weiteren Details; Durchschnittswerte sind ausreichend.

Servicepunkte (Haltestellen):

Servicepunkte für die APEROL-Mobilitätsszenarien sind dienstleistungs- bzw. verkehrsträgerabhängig. Für den heutigen ÖPNV werden die bestehenden Haltestellen genutzt, wie sie vom Betreiber ASEAG definiert wurden. Im Hinblick auf die neuen Mobility-on-Demand-Dienste mit autonomen Shuttles wurden viele virtuelle Servicepunkte nach einigen sinnvollen Kriterien erstellt:

- Der Reisende sollte nicht länger als 150 Meter laufen, um zum nächsten Servicepunkt zu gelangen oder um vom Ziel-Servicepunkt zum endgültigen Standort zu gelangen.
- Der Reisende darf eine Hauptstraße nicht überqueren, um zu einem Servicepunkt in 150 Meter Entfernung zu gelangen.
- Die neuen Servicepunkte dürfen nicht mit den bestehenden Bushaltestellen zusammenfallen.
- Die neuen Servicepunkte müssen den Netzwerkknoten (und nicht den Verbindungen) zugeordnet und gleichmäßig über das Netzwerk verteilt sein.

Für jeden Servicepunkt, der einem beliebigen Netzwerkknoten zugeordnet ist, wird eine zusätzliche (virtuelle) Verbindung eingeführt. Die virtuelle Verbindung ist sehr kurz und mit diesem Netzpunkt verbunden. Diese zusätzliche Verbindung könnte man sich als eine vertikale Servicepunkt-Warteschlange vorstellen. Der Einfachheit halber wurde nicht berücksichtigt, ob die den Servicepunkten zugeordneten Straßen ausreichend Platz bieten, um mehrere Shuttles dort halten zu lassen. Zur Begründung dieser Entscheidung ist zu erwähnen, dass es sich bei den Shuttle-Szenarien mit Mobility on Demand um Zukunftsszenarien handelt. Bis dahin können die entsprechenden Straßenbaumaßnahmen durchgeführt werden.

Die folgende Abbildung zeigt das Aachener Netz mit allen Servicepunkten für autonome Shuttles.

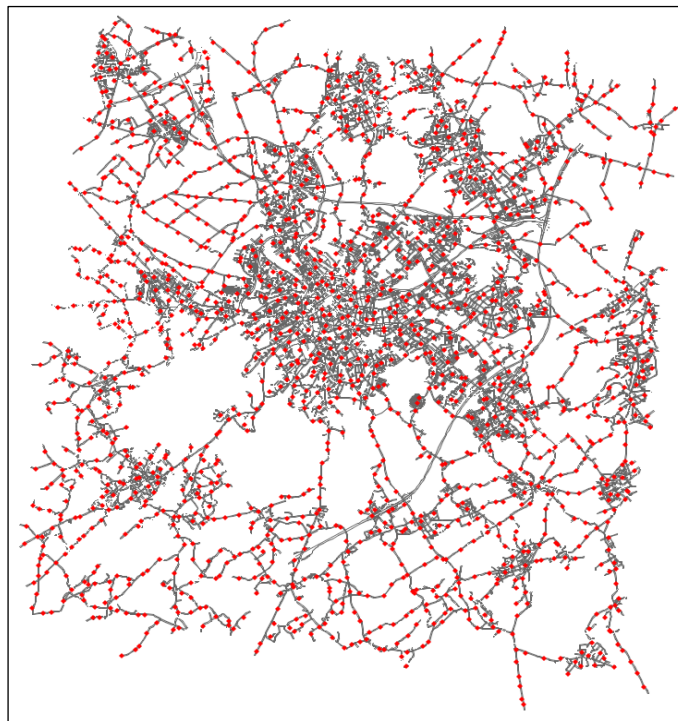


Abbildung 3.10: Die Servicepunkte (ÖPNV und autonome Shuttles) im Simulationsnetz Aachen.

Scoring-Funktionen und Umplanungsstrategien:

MATSim bietet einen co-evolutionären Algorithmus, um die Pläne der Agenten über viele Iterationen anzupassen und schließlich ein Gleichgewicht zu erreichen. Das Gleichgewicht kann als eine Optimierung innerhalb eines bestimmten Rahmens von Beschränkungen betrachtet werden, bei der die Agenten ihre Pläne nicht einseitig weiter verbessern können.

Der co-evolutionäre Algorithmus ist in zwei Schritte unterteilt: (1) Nach jedem Simulationslauf bzw. jeder Iteration wird die tatsächliche Leistung der Pläne jedes Agenten durch Scoring-Funktionen berechnet. (2) Auf der Basis der Scoring-Werte und anderer Zustandsvariablen modifizieren einige Agenten ihre Plansammlung durch Kopieren und Mutieren einzelner Pläne. Für MATSim werden üblicherweise vier Planungsdimensionen betrachtet: Abfahrtszeit, Route, Modus und Ziel. Im Rahmen der APEROL-Simulation soll nur der Transportmodus durch Co-Evolution beeinflusst werden.

Zur Definition der Scoring-Funktionen wurde eine Kooperation mit dem Human-Computer Interaction Center (HCIC) der RWTH Aachen eingegangen. Die Herausforderung bestand darin, alle relevanten Entscheidungskriterien der Nutzer (Attribute des Mobilitätsangebots) zu identifizieren und die Abstufungen der Attribute so zu definieren, dass sie von den Nutzern in einer Befragung verstanden werden, gleichzeitig aber auch in Simulationsparameter übersetzt werden können. Die folgenden Kriterien wurden als relevant deklariert:

1. Fahrzeit (bezogen auf die minimale Transportdauer)	5. Mögliche Verspätungen am Zielort
2. Entfernung zu Fuß	6. Eigenes Transportmittel
3. Kosten/Kilometer	7. Wartezeit (relativ zur gewünschten Abfahrt)
4. Anzahl der Passagiere	8. Anzahl der Übertragungen

Für alle diese Kriterien wurden bis zu fünf sinnvolle Stufen definiert. Beispiel für das erste Kriterium (Fahrzeit): L1 = kürzest mögliche Zeit, L2 = 5 Minuten länger, L3 = 10 Minuten länger, L4 = 15 Minuten länger, L5 = 20 Minuten länger.

Darüber hinaus wurden sinnvolle Szenarien definiert, indem die Umfrageergebnisse von 200-300 Teilnehmern kombiniert wurden. Mit den Interviewdaten wurde eine Conjoint-Analyse durchgeführt. Die Szenarien flossen nicht direkt in den Conjoint ein, sondern bildeten den Rahmen dafür. Schließlich wurde aus den Befragungsergebnissen die Parametrisierung der Scoring-Funktion abgeleitet.

Neuplanung:

Für die Neuplanung wurde die Standardfunktionalität verwendet, die mit MATSim geliefert wird. Es wurde keine spezielle Replanning-Strategie implementiert.

3.1.2.5 Simulation Experimente

Eines der herausragenden Ziele von APEROL ist die Untersuchung von Mobilitätslösungen, bei denen autonome,

bedarfsgesteuerte Shuttle-Dienste eine mehr oder weniger entscheidende Rolle spielen. Ein Hauptarbeitspaket ist in diesem Zusammenhang eine agentenbasierte Simulation des gesamten Verkehrs in Aachen und basiert auf einer erweiterten Version von MATSim, die mit einer Mobilitätszentrale interagiert. Die Simulationsumgebung ist in diesem Zusammenhang als Testumgebung für Flottenmanagement-Algorithmen und Optimierungsverfahren (AMoD-Algorithmen) zu betrachten und zur Evaluierung verschiedener zukünftiger Verkehrsszenarien mit unterschiedlichen Verteilungen der Verkehrsarten.

Um mögliche Alternativen von Mobilitätssystemen und -diensten zu untersuchen, wurden einige Szenarien definiert. Solche Szenarien repräsentieren bestimmte Phasen auf einer Mobilitäts-Roadmap und zeigen damit auch unterschiedliche Automatisierungsgrade. Die Simulationsergebnisse dieser Szenarien liefern wertvolle Informationen über Leistung, Kosten, Nutzerakzeptanz und Flottengrößen.

Zu erwähnen ist, dass die Simulation auch das Verhalten der Verkehrsteilnehmer / Reisenden einbezieht. Dies liegt daran, dass mittels spezifischer MATSim-Scoring-Funktionen und Umplanungsregeln der Einfluss psychologischer Variablen Teil der Modellierung ist.

Szenario-Definition:

Die simulationsbasierte Mobilitätsuntersuchung im Rahmen von APEROL folgt einem Szenario-Ansatz, der die wahrscheinlichsten und relevantesten Aspekte zukünftiger Verkehrssysteme für urbane Gebiete anspricht. Solche Szenarien definieren hauptsächlich mögliche Verkehrsmittelmuster. Die Idee ist, mit der heutigen Verkehrssituation in Aachen zu beginnen und mit denkbaren Zukunftsszenarien zu experimentieren. Die Zukunftsszenarien zeichnen sich durch eine flexiblere Form des öffentlichen Verkehrs oder einen größeren Anteil an On-Demand (autonomen) Shuttles aus. Die drei Szenarien sind die folgenden (APT = Autonomous Public Transport):

Nr.	Name	Beschreibung	Themen von Interesse
1	Heute	- IT, PT-Anteile Aachen 2020	- Ist es möglich, den heutigen Aachener Verkehr realistisch zu modellieren?
2	Flexibleres APT	- Kleinerer IT-Anteil als Aachen 2020 - Vorhandene PT-Haltestellen - Kleinere Busse, höhere Frequenz - Semi-flexible Leitungen - Definierte Benutzerwahrnehmung und -verhalten (Neuplanung)	- Welche Transportmodus-Drift kann erkannt werden? - Wie würde das PT / APT-System skalieren, wenn immer mehr private PKW-Reisende auf PT / APT umsteigen? - Was wären die Folgen für den Gesamtverkehr in Aachen in Bezug auf die Verkehrsbelastung und die Wartezeiten?

Nr.	Name	Beschreibung	Themen von Interesse
3	AMoD Shuttles	- Die gesamte Verkehrsnachfrage in Aachen wird von AMoD-Shuttles unterschiedlicher Größe bedient	- Wie viele Shuttles werden benötigt, um akzeptable Wartezeiten zu gewährleisten? - Was wären die Folgen für den Gesamtverkehr in Aachen in Bezug auf Verkehrsbelastung und Reisezeiten?

Der Zweck des ersten Szenarios „Heute“ ist es, die Simulationsumgebung mit ihrer Konfiguration und ihren Datenbanken zu kalibrieren. Die Methodik, um dies zu beweisen, ist der Vergleich eines Werktagsszenarios in Aachen unter Verwendung von Informationen aus MATSim mit TomTom® (TomTom Traffic™ API). Eine gute Übereinstimmung ist ein starkes Indiz dafür, dass die Simulation nah an der Realität ist. Daher besteht das Hauptziel darin, ähnliche Muster der Verkehrsbelastung im Netzwerk und deren zeitliche Entwicklung in MATSim und TomTom Traffic™ zu sehen. Von besonderem Interesse sind dabei die Muster des Schwerverkehrs. Beachten Sie, dass für das Simulationsverhalten nur eine Iteration notwendig ist, da die Verkehrsmittelanteile auf die aktuelle modale Aufteilung für Aachen festgelegt sind.

Im zweiten Szenario „Flexiblerer APT“ soll das APT-Angebot dichter und flexibler sein, als es heute in Aachen ist. Flexibler bedeutet kleinere (autonome) Busse, höhere Frequenz und Variation der Routen innerhalb bestimmter enger Grenzen. In diesem Szenario würde untersucht, wie viele private Pkw-Reisende auf den ÖPNV umsteigen würden, wenn das APT-Angebot attraktiver ist. Es wird erwartet, dass diese Drift vom IT zum ÖPNV durch Scoring und Umplanung (die Wahrnehmung und das Verhalten der Reisenden) nach mehreren Iterationen verursacht wird. Das primäre Ziel ist es, einen Hinweis darauf zu erhalten, (1) wie stark die Drift ist, (2) welche Auswirkungen sie auf die Größe der ÖPNV-Flotte hat und (3) was die Konsequenzen für den Gesamtverkehr in Aachen sind. Das Hauptziel ist es, den Mehrwert solcher Maßnahmen zu bestimmen, die ein nächster Migrationsschritt hin zu einem flexibleren und nachhaltigeren Verkehrssystem sein könnten. Beachten Sie, dass für die Simulationsdurchführung nur eine Iteration notwendig ist, da die Verkehrsmittelanteile fest vorgegeben sind.

Das letzte Szenario „AMoD Shuttles“, geht davon aus, dass der gesamte tägliche Personenverkehr in Aachen nur noch von AMoD Shuttles unterschiedlicher Größe bedient wird. Dies bedeutet implizit, dass es keine privaten Autos mehr gibt und der ÖPNV seine Endform in Bezug auf Flexibilität und Komfort erreicht hat. Von größter Bedeutung ist dabei die Frage nach der Größe der notwendigen Shuttle-Flotte. Und auch, was dies für den Shuttleverkehr in Aachen bedeuten würde (Verkehrsströme, Fahrzeiten, Gesamtbelastung, ...).

Was die Flottendimensionierung von APT und Shuttles betrifft, so besteht der Ansatz darin, mehrere Größen in der Simulation zu testen. Die Auswertung der Experimente ermittelt

Mittelwerte, Standardabweichungen und Maximalwerte von

(1) Fahrgastwartezeiten und (2) Fahrzeiten. Die optimale Flottengröße hängt offensichtlich von Festlegungen wie akzeptablen Warte- und Fahrzeitstatistiken (zur Messung der Fahrgastzufriedenheit), akzeptablen Verkehrsbedingungen (den Zielen des Straßenbetreibers) und auch Betriebskosten (die hier nicht betrachtet werden) ab. Die Kombination solcher Bewertungskriterien mit dem funktionalen Zusammenhang zwischen Flottengröße und Wartezeiten hilft bei der Bestimmung der optimalen Flottengröße.

Ergebnisse der Simulation:

Die drei vorgeschlagenen Szenarien wurden mit Hilfe der APEROL-Simulationsumgebung untersucht, die aus dem Verkehrssimulationsteil MATSim und dem APEROL Mobility Center (inkl. Flottenmanagement und den dazugehörigen AMoD-Algorithmen) besteht. Die Simulationsläufe basieren auf der aktuellen Verkehrsnachfrage (in Bezug auf die Anzahl der Fahrten) von Aachen. Bei den Szenarien, die mehrere Iterationen benötigten, wurden 15 Iterationen durchgeführt.

Szenario 1:

Die Ergebnisse von Szenario 1 zeigen, dass es durch die Konfiguration und Kalibrierung der erweiterten MATSim-Simulation möglich ist, den aktuellen Verkehr von Aachen mit seinem aktuellen Modal Split realistisch abzubilden. Für dieses Szenario wurde ein durchschnittlicher Werktag gewählt, und es wurden mehrere Simulationsiterationen durchgeführt, um das Routenmuster der Simulation zu optimieren. Anschließend wurden die Reisezeiten der Netzwerkverbindungen mit entsprechenden historischen Reisezeiten aus dem TomTom®-Dienst „TomTom Traffic Stats“ verglichen. Wie in der untenstehenden Grafik zu sehen ist, stimmen die Reisezeitklassen weitgehend mit den historischen von TomTom® erhaltenen überein. Sei L sei die Menge aller Netzwerkverbindungen, h sei eine Zeitscheibe von einer Stunde, und L_h^* die Menge der Verbindungen l_k^h , für deren mittlere Simulations-Reisezeit tt_{sim}^h das Folgende gilt: $tt_{sim}^h \in \left[\frac{1}{2} tt_{tom}^h, 2 tt_{tom}^h \right]$, wobei tt_{tom}^h die mittlere TomTom-Reisezeit der Verbindung k für die Zeitscheibe h . Zum Beispiel wurde für die Rushhour um 8 Uhr morgens folgendes Verhältnis gefunden: $|L_{8am}^*| \cong 0.895 |L|$. Zusätzlich zu den Werten für das Reisezeitverhältnis wurde festgestellt, dass die aus TomTom- und Simulationswerten abgeleiteten Staumuster im Netz sehr ähnlich waren, was ebenfalls auf eine sehr ähnliche Verkehrsdynamik hinweist.

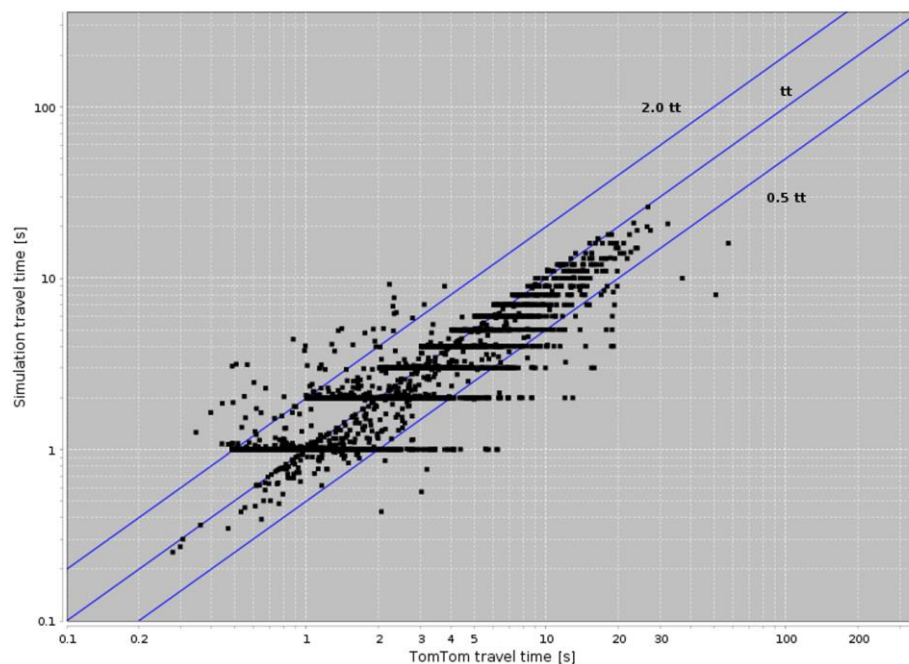


Abbildung 3.11: Die Grafik zeigt die Korrelation von TomTom- und Simulationsfahrzeiten für alle Netzwerkverbindungen. Wie zu sehen ist, befindet sich die Mehrheit der Verbindungen innerhalb der diagonalen Scheiben.

Szenario 2:

Das Szenario 2 widmet sich der Frage, ob die gesamte Mobilität in Aachen mit kleineren (autonomen) Bussen auf festen Linien-Routen bedient werden kann. Dabei sollen die Linien-Routen möglichst weitgehend mit den aktuellen ASEAG Fahrplänen übereinstimmen. Die Busflotte soll beträchtlich größer sein als heute, wobei die Busse dann kleiner wären und eventuell autonom betrieben werden. Die Taktzahl der Busse erhöht sich entsprechend der Busflottengröße.

Um die optimale Taktzahl pro Linien-Route zu bestimmen, wurde der folgende Algorithmus implementiert:

1. Starte das schrittweise Verfahren für jede Route mit einer großen Flotte und einem sehr engen Takt.
2. Führe eine Verkehrssimulation für einen typischen Tag durch und werte die mittleren / maximalen Wartezeiten der Reisenden aus.
3. Wiederhole, bis die mittleren Wartezeiten oberhalb eines definierten Toleranzwertes liegen:
 - Vergrößere den Takt der Busse (reduziere die Flottengröße)
 - Simuliere den Verkehr für einen Tag
 - Bestimme die Wartezeiten

Um Ende ergibt sich ein Service, der der Nachfrage für die einzelnen Linien-Routen optimal bedient (in dem Sinne, das vorgegebene Wartezeiten nicht überschritten werden).

Zusätzlich wurden in Aachener Außenbezirken einige weitere Linien-Ringrouten und Haltestellen heuristisch eingeführt. Es zeigte sich, dass hiermit die Anbindung der Außenbezirke wesentlich verbessert werden konnte.

Ergebnisse:

Mit kleineren Bussen (15-25 Plätze) und einer maximal 5-fachen Taktzahl kann die Mobilität aller Menschen in Aachen abgesichert werden. Nicht für alle Linien und Routen und Tageszeiten muss die Taktzahl verfünffacht werden. Die Wartezeiten bleiben dabei im Schnitt unter 4 Minuten (max=13 Min.). In den Außenbezirken wurden dazu 12 zusätzliche Ringrouten mit neuen Haltestellen eingeführt.

Szenario 3:

Im Szenario "AMoD Shuttles" wird der gesamte Personenverkehr durch autonome Shuttles realisiert. Es wurden mehrere Simulationen mit unterschiedlichen Shuttle-Flottengrößen (aber festem Verhältnis der Shuttle-Größen) für die Verkehrsnachfrage von Aachen durchgeführt. Vorerst wird aus Performancegründen die 24-Stunden-Simulation aus Performancegründen vorerst auf 50% der tatsächlichen Verkehrsnachfrage herunterskaliert. Die nächste geplante Version der APEROL-Simulationsumgebung, die sich in der Entwicklung befindet, wird solche Skalierungsgrenzen überwinden.

Ziel der Simulationsexperimente war es, die optimale Größe zu definieren, die einen akzeptablen Service für die Kunden bietet (d.h. Abholwartezeit kleiner als ein vorgegebener Schwellenwert). Eine weitere Frage von Interesse war die Sättigung des Straßenverkehrssystems durch die Shuttle-Flotte (vor allem Fahrzeiten).

Die Simulationsergebnisse, die als Korrelationen zwischen mittleren Abholwartezeiten, nicht bedienten Fahrten und Größen der autonomen On-Demand-Shuttle-Flotten dargestellt werden, sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt (SD = Standardabweichung):

Flottengröße (# Shuttles)	Pickup-Wartezeit [s]			Nicht bedient Fahrten	Shuttle- Anfragen
	Mittelwert	SD	Max		
5000	2080.0	1554.9	6857.0	32%	100.2
7500	273.4	371.0	3418.0	2%	95.5
10000	38.1	46.3	745.0	0%	78.1
12500	25.4	31.6	598.0	0%	66.1
15000	19.7	25.5	694.0	0%	56.9
17500	17.0	22.5	687.0	0%	49.8

Für den Fall, dass eine Fahrt überhaupt nicht bedient wird, wurde die Wartezeit auf 3600 Sekunden gesetzt. Sowohl die obige Tabelle als auch das folgende Diagramm bestätigen die Regel, dass die Wartezeiten bei der Fahrgastabholung umso größer sind, je kleiner die Flottengröße ist und je höher die Anzahl der nicht bedienten Fahrten ist.

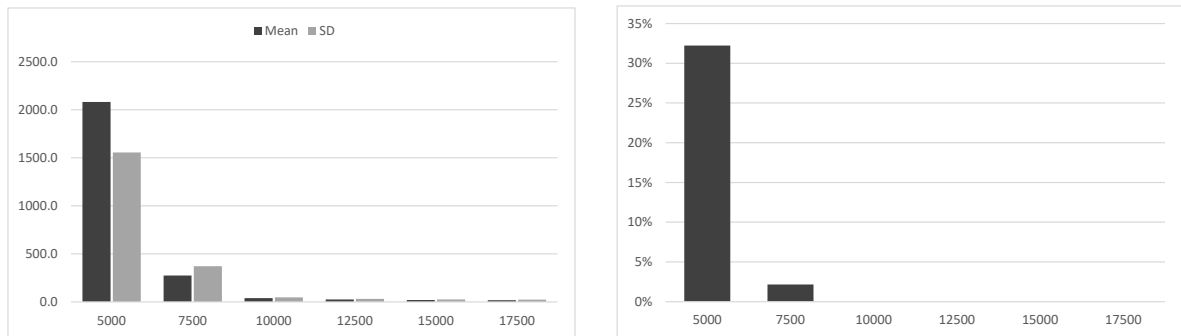


Abbildung 3.12: Links: Die x-Achse dieses Diagramms zeigt die Shuttle-Flottengrößen. Die entsprechenden Werte der Abholwartezeit (pro Flottengröße) sind eingezeichnet (Mittelwert und Standardabweichung). Rechts: Die Anzahl der nicht bedienten Fahrten pro Flottengröße.

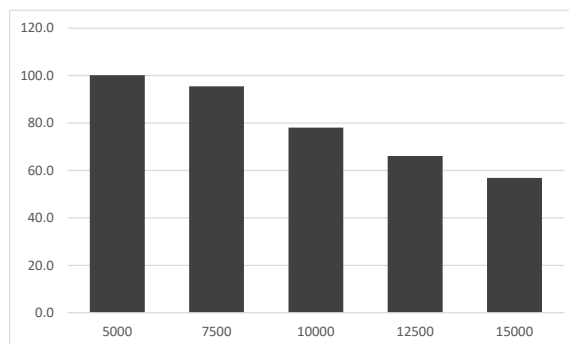


Abbildung 3.13: Die durchschnittliche Anzahl der Anfragen pro Tag, die die Shuttles in Abhängigkeit von der Flottengröße bedienen.

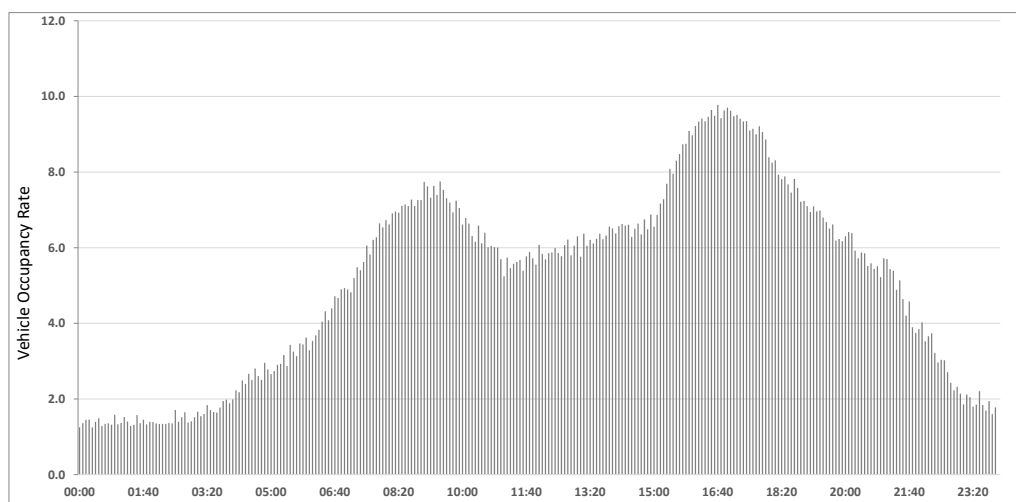


Abbildung 3.14: Der Fahrzeugbesetzungsgrad über den Tag (gemittelt über 5-Minuten-Zeitintervalle).

Es wird angenommen, dass eine vernünftige und akzeptable mittlere Abholwartezeit weniger als 3 Minuten bei einer Standardabweichung von weniger als 3 Minuten beträgt. Daraus lässt sich ableiten, dass eine Flottengröße von ca. 10.000 Shuttles (mit gleichem Anteil von 7 und 15 Plätzen) in der Lage wäre, alle Fahrten in Aachen über den Tag verteilt zu bewältigen, die heute dem Individual- und dem öffentlichen Verkehr zugeordnet sind. Es ist auch offensichtlich - wenn auch hier nicht explizit dargestellt - dass eine solche Shuttle-Flotte eine deutlich geringere Verkehrsbelastung im Aachener Netz ergeben würde.

3.2 Voraussichtlicher Nutzen

Das Marktpotential für die Nutzung des speziell erworbenen Knowhows als Consultant-Partner und die Vermarktung der Verfahrensansätze in anderen Projekten ist für ein KMU wie MAT.TRAFFIC attraktiv. Hingegen ist das Marktpotential für Mobilitätsservices auf der Basis autonomer Flotten eher nur langfristig realisierbar.

Bisher wurden im Jahr 2021 Erkenntnisse und Lösungen aus dem APEROL Projekt in ein verkehrstechnisches Consulting Projekt mit einer deutschen Stadt eingebracht, in dem es auch um großräumige Verkehrssimulationen geht. Weitere Ergebnisse des APEROL Projekts konnten bisher nicht direkt als Produkte oder Dienstleistungen verwertet werden. Jedoch sind die Aussichten auf Erreichung kurz- bis mittelfristiger Ziele des Verwertungsplans gut. Vor allem das besondere Knowhow im Bereich Verkehrssimulation und Flottenmanagement autonomer Fahrzeuge werden wichtige Faktoren bei der Akquisition neuer Dienstleistungsprojekte in Deutschland und den USA sein. Die längerfristigen Ziele sind daher nach wie vor gültig.

3.3 Bekannt gewordener Fortschritt

Während der Durchführung des Vorhabens sind dem Zuwendungsempfänger keine fachlichen Ergebnisse / Fortschritte bekannt geworden, die sich auf stadtweite Verkehrssimulationen autonomer Shuttle-Services beziehen.

3.4 Erfolgte bzw. geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

MAT.TRAFFIC hat das Kapitel 3 des Fachbuchs „Smart Transportation: AI Enabled Mobility and Autonomous Driving“ geschrieben. Der Titel des Kapitels ist „Large-scale Simulation of a Mobility-on-Demand System for the German City Aachen“. Das Buch erscheint Mitte 2021. Herausgeber sind Prof. Dr.-Ing. Guido Dartmann, Prof. Dr. Martina Ziefle und andere.

4 Adresse und Ansprechpartner des Projektpartners MAT.TRAFFIC GmbH

MAT.TRAFFIC GmbH	Dr. Paul Mathias Heinrichsallee 40, 52062 Aachen Telefon: +49 (241) 565 29576 Fax: +49 (241) 565 29578 E-Mail: paul.mathias@mat-traffic.de
------------------	--