
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr
Professur für Mobilitätsystemplanung

Jonas Krombach, Vahid Noroozi, Matthias Ribesmeier, Dr. Dominik Ziemke,
Prof. Dr. Regine Gerike,
Gregor Leich, Chengqi Lu, Simon Meinhardt, Christian Rakow, Gregor Rybczak,
Tilmann Schlenther, Prof. Dr. Kai Nagel,
Benjamin Wagner

NaMAV – Nachhaltige Mobilität und städtebauliche Qualitäten durch Automatisierung im Verkehr

Verbundschlussbericht



Teil I und II

NaMAV – Nachhaltige Mobilität und städtebauliche Qualitäten durch Automatisierung im Verkehr

Verbundschlussbericht

Ausgearbeitet von:

Dipl.-Ing. Jonas Krombach

M.Sc. Vahid Noroozi

Dipl.-Ing. Matthias Ribesmeier

Dr.-Ing. Dominik Ziemke

Prof. Dr.-Ing. Regine Gerike (Projektleitung)

(*TU Dresden, Professur für Mobilitätssystemplanung*)

M.Sc. Gregor Leich

M.Sc. Chengqi Lu

M.Sc. Simon Meinhardt

M.Sc. Christian Rakow

M.Sc. Gregor Rybczak

M.Sc. Tilmann Schlenther

Prof. Dr. Kai Nagel

(*TU Berlin, Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik*)

Dipl.-Geo. Benjamin Wagner

(*Stadt Leipzig, Verkehrs- und Tiefbauamt*)

Förderkennzeichen: 01UV2081A, 01UV2081B und 01UV2081C

Projektaufzeit: 01.11.2020 bis 30.04.2024

„Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert das Projekt *NaMAV* im Rahmen der Strategie „Forschung für Nachhaltigkeit“ (FONA) www.fona.de im Förderenschwerpunkt Sozial-ökologische Forschung unter dem Förderkennzeichen 01UV2081. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.“

Im Auftrag des

Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) – MobilitätsZukunftsLabor
2050

Inhaltsverzeichnis

Teil I Kurze Darstellung	2
Teil II Eingehende Darstellung	4
1 Einführung, Problem- und Zielstellung.....	4
2 Erläuterung der Projektstruktur	7
3 Literaturüberblick und Praxisbeispiele.....	9
4 Entwicklung von Einsatzszenarien.....	15
5 Modellierung der Einsatzszenarien.....	18
6 Implementierung und Simulation der Einsatzszenarien	26
7 Bewertung der Einsatzszenarien.....	30
8 Handlungsempfehlungen und Ausblick	33
9 Bearbeitungstechnische Zusammenfassung des Forschungsprojektes und Ausblick 36	
10 Literaturverzeichnis	40

Teil I Kurze Darstellung

Die Technische Universität Dresden, Professur für Mobilitätssystemplanung (TUD MSP) hat als Projektkoordinatorin im Projektkonsortium mit der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet für Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik (TUB VSP) und der Stadt Leipzig, Verkehrs- und Tiefbauamt (VTA Leipzig) das Projekt "Nachhaltige Mobilität und städtebauliche Qualitäten durch Automatisierung im Verkehr" (kurz: *NaMAV*) verantwortet.

Die zentrale Aufgabe des Projekts *NaMAV* war die Entwicklung von zukunftsfähigen Einsatzszenarien für die Stadt Leipzig unter besonderer Beachtung einer nachhaltigen urbanen Mobilitätsentwicklung, wie sie u.a. in der Leipziger Mobilitätsstrategie 2023 (Nachhaltigkeitsszenario) beschrieben ist. Besonderer Fokus lag hierbei auch auf zukünftige Entwicklungen des automatisierten, insbesondere von hoch- bzw. vollautomatisierten Fahrzeugen (SAE Level 4 und 5), denn im Zuge einer dynamisch fortschreitenden Digitalisierung ist davon auszugehen, dass in Zukunft urbane Verkehre automatisierter Ablauen werden.

Ausgehend von einer umfassenden Literaturrecherche und unter Hinzunahme der Erkenntnisse aus drei *NaMAV*-Zukunftslaboren mit dem Projektbeirat wurden drei Einsatzszenarien entwickelt:

- **Szenario 1 („Autoarme Quartiere“):** Bei diesem Szenario werden sogenannte „autoarme Quartiere“ in ausgewählten Bereichen der Stadt definiert. Diese Quartiere dürfen weder vom motorisierten Individualverkehr befahren noch beparkt werden. Ausnahmen bilden Lieferverkehre und besondere Fahrten, beispielsweise von Personen mit Mobilitätseinschränkungen. Die Szenariokonzeption basiert auf dem Prinzip der 15-Minuten-Stadt.
- **Szenario 2 („Flexible Angebote im öffentlichen Verkehr“):** In diesem Szenario wird sich mit der Ausweitung des On-demand-Services „Flexa“ der Leipziger Verkehrsbetriebe auseinander gesetzt. Im Speziellen wird untersucht, wie eine mögliche Ausweitung von „Flexa“ zu einem bedarfsgerechten Mobilitätsangebot (DRT = demand responsive transit) in Form von autonomen Shuttles aussehen könnte.
- **Szenario 3 („Geschwindigkeitsreduktion“):** Dieses Szenario beschreibt im Detail, was passieren würde, wenn man die zulässige Geschwindigkeit des motorisierten Individualverkehrs auf dem gesamten städtischen Straßennetz um 40 % reduzieren würde.

Nach der qualitativen Entwicklung der Einsatzszenarien wurden diese in einem nächsten Schritt in die agentenbasierten Verkehrssimulationssoftware MATSim¹ (Multi-Agent Transport Simulation) umgesetzt. Unter anderen die Stadt Leipzig, die Leipziger Verkehrsbetriebe sowie die TU Dresden lieferten wichtige Daten zur Erstellung und Kalibrierung des Verkehrsmodells. Mit Hilfe von MATSim konnten für jedes Einsatzszenario die entsprechenden individuellen Wirkungen des Szenarios abgeschätzt werden. In einem Bewertungssystem, welches auf dem Leitbild für nachhaltige Mobilität basiert, wurden anschließend die Szenarien bewertet.

Mit diesen Erkenntnissen konnten abschließend Handlungsempfehlungen für die Stadt Leipzig sowie übergeordnet für weitere urbane Räume abgeleitet werden.

Um das Ziel nachhaltiger Mobilität zu erreichen, zeigte sich, dass die Kombination aus Pull-Maßnahmen (Szenario 2) und Push-Maßnahmen (Szenario 1 und 3) besonders zielbringend ist. Durch eine Implementierung des Szenario 1 (Autoarme Quartiere) werden deutliche Potenziale zur Umverteilung von Flächen im öffentlichen Straßenraum sichtbar. Darüber hinaus wird der Umstieg auf den Umweltverbund gestärkt. Das Szenario 2 zeigt große Potentiale für autonome Shuttle-Services auf, die als flexible Ergänzung zum linien- und fahrplangebundenen ÖV-Angebot eingesetzt werden könnten und das Szenario 3 schafft durch eine generelle Geschwindigkeitsreduktion auf den öffentlichen Straßen optimale Voraussetzungen für eine Einführung von mehr automatisierten Verkehren.

¹ <https://www.matsim.org/>

Teil II Eingehende Darstellung

1 Einführung, Problem- und Zielstellung

Der nachfolgende Bericht konsolidiert die unter FKZ 01UV2081A, 01UV2081B und 01UV2081C im Verbundprojekt "Nachhaltige Mobilität und städtebauliche Qualitäten durch Automatisierung im Verkehr" (kurz: *NaMAV*) durchgeführten Arbeiten während der Laufzeit des Vorhabens vom 01.11.2020 bis 30.04.2024. Die Technische Universität Dresden, Professur für Mobilitätssystemplanung (TUD MSP) hat als Projektkoordinatorin im Projektkonsortium mit der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet für Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik (TUB VSP) und der Stadt Leipzig, Verkehrs- und Tiefbauamt (VTA Leipzig) das Projekt verantwortet.



Abbildung 1: Projektkonsortium (Quellen der Logos: TUD MSP, Stadt Leipzig, TUB VSP)

Wie viele andere Städte in Deutschland steht die Stadt Leipzig vor enormen verkehrlichen Herausforderungen. Die Stadt gehört zu den am schnellsten wachsenden Großstädten in Deutschland. Laut der aktuellen Bevölkerungsprognose aus dem Jahr 2023 wird die Bevölkerung Leipzigs im Jahr 2030 auf rund 639.000 Einwohnerinnen und Einwohnern geschätzt; für das Jahr 2040 wird ein weiterer Anstieg auf rund 664.000 Einwohnerinnen und Einwohner prognostiziert (Stadt Leipzig 2023). Die im Jahr 2018 im Rahmen der Verkehrserhebung „Mobilität in Städten – SrV“ erhobenen Daten zur Alltagsmobilität zeigen, dass mehr als ein Drittel (36,5 %) aller Wege der Leipziger Bevölkerung mit dem motorisierten Individualverkehr (MIV) zurückgelegt werden (Stadt Leipzig 2020). Die Dominanz des motorisierten Verkehrs bringt erhebliche negative Effekte für die Stadtbevölkerung mit sich, was sich u. a. in Grenzwertüberschreitungen bei den städtischen Luft- und Lärmemissionen (Stadt Leipzig 2019), einer erhöhten Anzahl an Unfällen mit Personenschäden (Polizeidirektion Leipzig 2021) oder unzureichenden Aufenthaltsqualitäten öffentlicher Räume direkt zeigt. Die Stadt Leipzig bekennt sich zur Bewältigung dieser Herausforderungen und strebt eine deutliche Erhöhung der Lebensqualität für die Leipziger Stadtbevölkerung an. Im 2015 beschlossenen Stadtentwicklungsplan Verkehr und öffentlicher Raum (STEP VÖR) werden ambitionierte Ziele nachhaltiger Mobilität formuliert (Stadt Leipzig 2015). Im September 2018 hat sich der Leipziger Stadtrat einstimmig für das Nachhaltigkeitsszenario als einem

aus sechs diskutierten Szenarien des STEP VÖR ausgesprochen und damit deutlich einen auf Nachhaltigkeit ausgerichteten normativen Rahmen für die Verkehrs- und Mobilitätsplanung in Leipzig festgelegt. Der Anteil des motorisierten Individualverkehrs am Modal Split soll laut dem Nachhaltigkeitsszenario der Mobilitätsstrategie 2030 bis zum Jahr 2030 auf 30 % sinken; dies würde eine Verlagerung jedes fünften derzeit mit dem Kfz zurückgelegten Weg auf den Umweltverbund bedeuten (Stadt Leipzig 2017, Gerike et al. 2021).

Besondere Aufmerksamkeit in Leipzig genießt die Situation in der Innenstadt (heute: Gebiet innerhalb des Promenadenrings) und die Frage, ob sich mit einem weiteren Bevölkerungswachstum die Funktionen der Innenstadt und das Verständnis der Innenstadt nicht über den Promenadenring hinaus („Sprung über den Ring“) entwickeln muss. Für den Bereich innerhalb des Promenadenrings gibt es ein in 1993 beschlossenes und in 2008 fortgeschriebenes Konzept „autoarme Innenstadt“ (Stadt Leipzig 2008). Seit dem Jahr 2017 wurde der Prozess für ein neues Stadtraumkonzept erweiterte Innenstadt gestartet, welches am Nachhaltigkeitsszenario 2030 ausgerichtet ist und die neuen Ziele und Maßnahmen für den Verkehr in der erweiterten Innenstadt aufgreifen soll. Das Konzept umfasst den Bereich der heutigen Innenstadt, den Promenadenring sowie die Quartiere bis zum Tangentenviereck und ist damit rund 10-mal so groß wie die heutige Innenstadt. Parallel dazu wurde im Jahr 2021 das Mobilitätskonzept erweiterte Innenstadt Leipzig mit acht Leitzielen, 18 Einzelzielen und 74 Maßnahmen entwickelt (Gerike et al. 2021). Auch dieses Konzept weist eine enge Verzahnung mit den Zielstellungen des Nachhaltigkeitsszenarios 2030 auf.

Im Rahmen des Forschungsprojekts *NaMAV* sollten aufbauend auf den oben beschriebenen Strategien und Konzepten mögliche Zukunftsszenarien nachhaltiger urbaner Mobilität für die Stadt Leipzig ausgearbeitet werden. Ein besonderer Fokus sollte hierbei auf zukünftigen Entwicklungen des automatisierten städtischen Verkehrs, insbesondere von hoch- bzw. vollautomatisierten Fahrzeugen (Level 4 und 5) liegen. Es ist davon auszugehen, dass im Zuge einer dynamisch fortschreitenden Digitalisierung in Zukunft auch urbane Verkehre höher automatisiert ablaufen werden und so müssen geplante Straßenräume etwaige Entwicklungen vorausdenken, denn einmal umgestaltete Straßen bestehen unter Umständen lange und können nicht den hohen Dynamiken der Technologieentwicklung u. a. in der Kraftfahrzeugindustrie folgen.

Ziel des Forschungsprojektes *NaMAV* war es,

- Einsatzszenarien für hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge (Stufen vier und fünf) für die Stadt Leipzig zu erarbeiten,
- diese zu bewerten hinsichtlich Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie Auswirkungen auf die Ziele der strategischen Stadt- und Verkehrsentwicklungsplanung und insbesondere die formulierten Nachhaltigkeitskriterien,

- daraus Empfehlungen abzuleiten für konkrete Schritte zur Vorbereitung der Umsetzung von Maßnahmen im Rahmen ausgewählter Szenarien einschließlich Planungen für Meilensteine, Kommunikation und Beteiligung und
- die gewonnenen Erkenntnisse und erarbeiteten Szenarien auf ihre Übertragbarkeit auf andere urbane Räume und Kontexte zu prüfen und verallgemeinerbare Handlungsempfehlungen zu erarbeiten, wie sich Stadt- und Verkehrsplanung in urbanen Räumen auf die zu erwartende Automatisierung im Verkehr vorbereiten, diese gezielt steuern und so zum Erreichen der jeweils gesetzten verkehrspolitischen Ziele nutzen können.

2 Erläuterung der Projektstruktur

Das Forschungsprojekt NaMAV gliederte sich formal in vier Arbeitspakete:

- AP 1: Kommunikations- und Beteiligungsstrategie
- AP 2: Entwicklung von Einsatzszenarien
- AP 3: Modellierung von Szenarien
- AP 4: Ableitung Handlungsempfehlungen

In der nachfolgenden Abbildung sind die Arbeitspakete und deren Wechselwirkungen untereinander dargestellt. Farblich hervorgehoben ist jeweils der verantwortliche Partner für ein Arbeitspaket (AP); die jeweils beiden anderen Partner sind zusätzlich in jedes AP eingebunden.

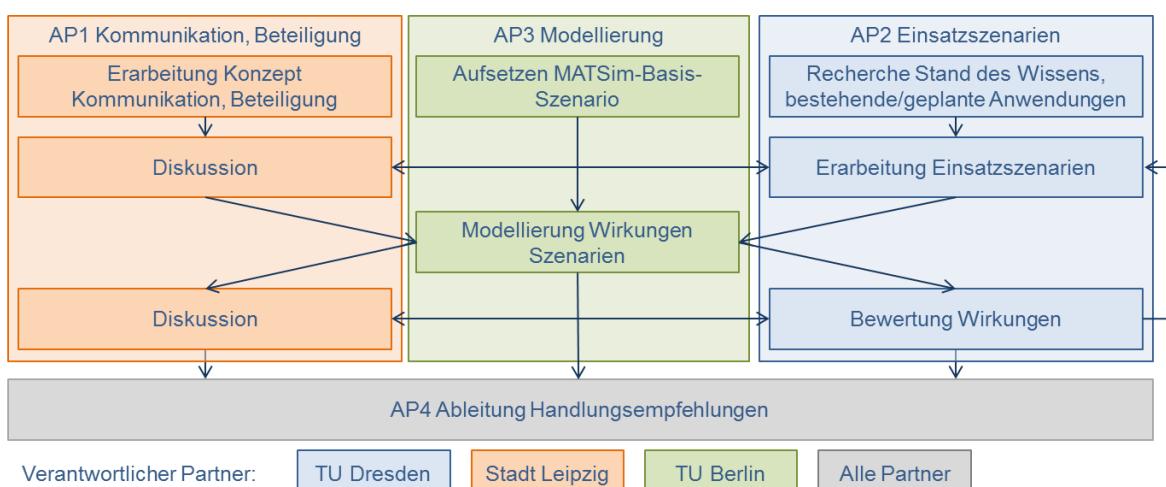


Abbildung 2: Übersicht Arbeitspakete im Projekt NaMAV (Quelle: Eigene Darstellung)

Zu Beginn des Forschungsprojekts wurde im Rahmen des **Arbeitspakets 1** eine Kommunikations- und Beteiligungsstrategie ausgearbeitet. Ein besonderer Fokus lag hierbei auf der Einrichtung eines Projektbeirats bestehend aus Vertreter:innen der Stadtverwaltung, der Kommunalpolitik, den Verkehrsbetrieben, Repräsentant:innen diverser Interessensvertretungen (z. B. ADFC, Fuß e.V.) sowie interessierten Personen aus der Zivilgesellschaft. In regelmäßigen Zeiträumen wurden sogenannte NaMAV-Zukunftslabore mit den Mitglieder:innen des Projektbeirats zu ausgewählten Themenstellungen veranstaltet. Die Rückkopplung der Zwischenstände und die Diskussion der Projektergebnisse innerhalb dieser Workshops stellte sich als sehr förderlich für das Forschungsprojekt heraus.

Das **Arbeitspaket 2** beschäftigte sich mit der Entwicklung von Einsatzszenarien. In einem ersten Schritt wurde eine Recherche zum aktuellen Forschungsstand durchgeführt. Danach wurden in enger Abstimmung mit den Projektpartnern sowie dem Projektbeirat und unter Beachtung des Leitbildes nachhaltiger Mobilität für Leipzig drei Einsatzszenarien zukünftiger städtischer Mobilität entwickelt. Auf diese Szenarien wird

im Detail in Kapitel 4 eingegangen. Das Leitbild nachhaltiger Mobilität wurde auch dazu genutzt, ein entsprechendes Bewertungsverfahren für die Einsatzszenarien aufzubauen. Auf dieses wird in Kapitel 7 eingegangen.

Das **Arbeitspaket 3**, die Modellierung von Szenarien mit MATSim (Multi-Agent Transport Simulation), bildet den Kern des Forschungsprojektes. MATSim ist eine agentenbasierte Verkehrssimulationssoftware (vgl. Horni et al. 2016). Die Software ist kostenlos und steht zur freien Nutzung (“Open Source”) zur Verfügung. Innerhalb des AP 3 wurde in einem ersten Schritt ein sogenanntes Basisszenario erstellt, welches die täglichen Verkehre der Leipziger Bevölkerung im Status Quo (Referenzjahr: 2018) simuliert. Ausgehend davon wurden dann im Laufe des Projektfortschrittes die zuvor in AP 2 entwickelten Einzelszenarien modellierungstechnisch in MATSim umgesetzt. In Kapitel 5 und 6 wird näher auf die verschiedenen Schritte der Modellierung eingegangen und ausgewählte Ergebnisse vorgestellt.

Den Abschluss des Forschungsprojektes bildete das **Arbeitspaket 4**, die Ableitung von Handlungsempfehlungen. Ausgehend von den Simulationsergebnissen könnten in diesem Arbeitspaket sowohl Handlungsempfehlungen für die Stadt Leipzig als auch übergeordnete Empfehlungen für urbane Räume abgeleitet werden. Diese Handlungsempfehlungen befinden sich im Kapitel 8 dieses Berichtes.

3 Literaturüberblick und Praxisbeispiele

Das Fundament der Szenarienentwicklung bildete eine umfassende Literaturrecherche zum aktuellen Forschungsstand und zu praktischen Anwendungen automatisierter Verkehre. Die Ergebnisse der Recherche werden in komprimierter Form zusammengefasst, danach wird in diesem Kapitel vertieft auf die Entwicklung der einzelnen Einsatzszenarien eingegangen.

3.1 Stufen des automatisierten Fahrens

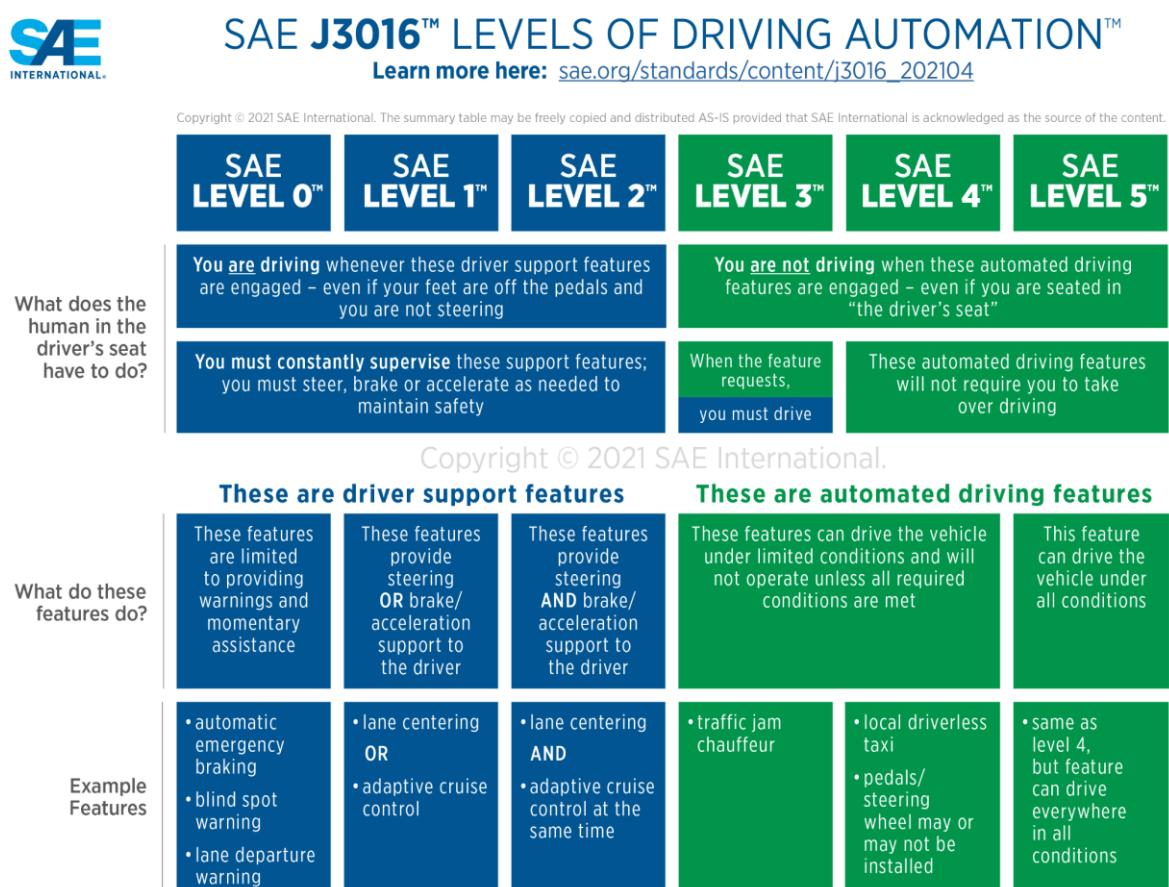


Abbildung 3: Stufen des automatisierten Fahrens (Quelle: SAE 2021)

Der Verband der Automobilingenieure, SAE International, definiert laut J3016-Standard sogenannte fünf Stufen (engl. Level) der Automatisierung (SAE 2021). Bei der Einteilung wird auf die individuelle Rolle des Fahrenden im Zusammenspiel mit dem Fahrzeug und dessen Technologie eingegangen.

Bei **Stufe 0** wird das Fahrzeug vollständig vom Fahrenden selbst und ohne Assistenzsysteme gefahren. Bei **Stufe 1** bekommt der Fahrende Unterstützung in Form von Assistenzsystemen beim Lenken, Bremsen und Beschleunigen. Beispiele sind der Spulhalteassistenz oder der Abstandsregeltempomat. Der Fahrende verantwortet weiter-

hin die Längs- und Querführung des Fahrzeugs und bekommt nur punktuelle Unterstützung. Man spricht von der **Stufe 2**, dem teilautomatisierten Fahren, wenn die Längs- und Querdynamik gleichzeitig gesteuert werden. Trotz unterstützenden Systemen bleibt bei dieser Stufe weiterhin die Verantwortung beim Fahrenden. In **Stufe 3**, dem hochautomatisierten Fahren, übernimmt das Fahrzeug zeitweise die Fahraufgabe, der Fahrende muss aber notfalls in der Lage sein, innerhalb einer Vorwarnzeit jederzeit einzutreten. In Deutschland bestehen seit 2017 die gesetzlichen Rahmenbedingungen für Stufe 3. Bei **Stufe 4**, dem vollautomatisierten Fahren, fährt das Fahrzeug in abgegrenzten Gebieten bzw. vordefinierten Situationen (z. B. maximale Geschwindigkeiten) autonom. Der Mensch ist nicht mehr dazu verpflichtet, in Notsituationen einsatzbereit zu sein. Fahrzeuge der Stufe 4 können auch alleine fahren. Bei **Stufe 5**, dem autonomen Fahren, fährt das Fahrzeug vollständig autonom im Straßenverkehr. Die Fahrzeuge müssen nicht über Steuerungselemente, wie Lenkrad, Gas- oder Bremspedal verfügen, und es gibt keine menschlichen Fahrenden mehr. (SAE 2021, ZF 2022)

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) hat aufbauend auf den fünf Stufen der SAE eine nutzerfreundliche Klassifizierung vorgenommen. Demnach wird nach drei Modi unterschieden (BASt o.J. a, KBA o. J.):

- Assistierter Modus (SAE Level 1 und 2)
- Automatisierter Modus (SAE Level 3)
- Autonomer Modus (SAE Level 4 und 5)

3.2 Chancen und Risiken des automatisierten Verkehrs

Der Stand des Wissens zu Chancen und Risiken des automatisierten Verkehrs lässt sich wie folgt zusammenfassen (FGSV 2020, Kong et al. 2024, Rahman & Thill 2023, Olayode et al. 2023, Makahleh et al. 2024, Orieno et al. 2024):

- **Verkehrssicherheit:** Als Chance wird angeführt, dass durch autonome Fahrzeuge die Verkehrsregeln (z. B. Geschwindigkeit, Überholverbote, Parkregelungen) strikter eingehalten werden. Darüber hinaus können Unfälle mit Personenschäden reduziert werden, da beim autonomen Fahren zukünftig menschliche Einflüsse durch Fehlverhalten reduziert werden. Als Risiko wird benannt, dass in der Übergangsphase zum vollständig autonomen Verkehr zunächst eine Mischnutzung von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden besteht. In dieser Phase könnte eine gewisse punktuelle Verschlechterung der Verkehrssicherheit eintreten, da Verkehrsteilnehmer Reaktionen (noch) falsch einschätzen würden.
- **Verkehrsablauf:** Durch diverse Steuerungselemente und die Vernetzung von Fahrzeugen kann die Effizienz des Verkehrsablaufes verbessert werden, sodass Infrastrukturen optimal ausgelastet werden und sich ein harmonisierender Effekt auf den Verkehrsablauf einstellen könnte. Gleichzeitig wird als Risiko aber

benannt, dass diese Effekte zunächst, bei einer längeren Übergangsphase, überschaubar ausfallen dürften. Auch hängen die Auswirkungen stark von den spezifischen Programmierungen der Fahrzeughersteller ab. Darüber hinaus wird als Risiko genannt, dass mögliche Einschränkungen auch bei Verkehrsteilnehmende in Kauf genommen werden müssen, die mit dem System nicht vernetzt sind (z. B. nicht motorisierte Verkehrsmittel wie Fuß- und Radverkehr). Ein weiteres Risiko ist laut den Autoren auch, dass etwaige Effizienzgewinne auch durch zusätzliche oder längere Fahrten kompensiert werden könnten.

- **Fahrleistung:** Neue Betriebsformen wie Sharing oder Pooling könnten zu einer Verringerung von Fahrleistungen führen, da zum Beispiel der Parksuchverkehr entfallen würde. Gleichzeitig sind durch die Betriebsformen auch eine Erhöhung der Auslastung von Fahrzeugen möglich. Gleichzeitig kann auch das Risiko entstehen, dass genau Umgekehrtes entstehen könnte, nämlich, dass es durch eine höhere Bequemlichkeit zu Mehrfahrten kommen könnte. Ferner könnte auch ein Risiko für mehr Leerfahren bestehen, beispielsweise, wenn höhere Parkgebühren in Innenstadtbereichen von den Nutzenden vermieden werden oder ÖV-Robotaxis sich ohne Kunden im Straßenraum bewegen.
- **Auswirkungen auf Fuß- und Radverkehr:** Als Chance für nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer kann gesehen werden, dass die Schutzbüroschriften zugunsten des Fuß- und Radverkehrs mehr eingehalten werden. Gleichzeitig wird aber vermutet, dass in der Übergangsphase von autonom fahrenden Fahrzeugen Zu-fußgehende und Radfahrende zunächst verunsichert sein könnten. Ebenfalls könnten Hauptverkehrsstraßen mehr als Barriere wahrgenommen werden, da autonome Fahrzeuge dichter hintereinanderfahren können und Querungsmöglichkeiten nur noch an vordefinierten Stellen möglich sein könnten. Gleichfalls könnte auch eine negative Modal-Split-Entwicklung eintreten. Kurze Wege könnten aufgrund der Bequemlichkeit zunehmend mit dem Pkw erledigt werden.
- **Straßenraum und Verkehrsflächen:** Durch eine höhere Nutzung von geteilten Verkehrsmitteln könnten Parkplätze in den Straßenräumen reduziert werden. Dies würde die Umverteilung von Flächen in Straßenräumen ermöglichen und damit verbunden die Steigerung von Straßenräumen. Durch eine bessere Nutzung der Straßenkapazitäten und die Reduzierung von seitlichen Bewegungsspielräumen besteht darüber hinaus die Chance, Straßenquerschnitte für den Pkw-Verkehr zu verringern. Auf der anderen Seite kann aber auch als Risiko ver-

mutet werden, dass bei einer Zunahme von Pkw-Verkehren v.a. auf Hauptverkehrsstraßen mehr Bedarf an Verkehrsflächen entsteht, da eine Separierung zwischen nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmenden und motorisiertem Verkehr zur Konfliktvermeidung notwendig werden kann.

- **Öffentlicher Verkehr:** Für den öffentlichen Verkehr wird sich durch autonome Fahrzeuge Einsparungspotential bei Personal(-kosten) erhofft. Ebenfalls ist eine bessere Abdeckung auch in unzureichend bedienten Stadtlagen durch autonome Dienste vorstellbar. Bedarfsgesteuerte Dienste als Ergänzung zum Linienverkehr können durch autonome Shuttleservices entstehen. Gleichzeitig könnte sich die Einsparung der Personalkosten womöglich nicht bemerkbar machen, da höhere Ausgaben für autonome Services entstehen (z. B. bei der Wartung und Überwachung). Darüber hinaus ist auch ein Rückgang der Fahrgastzahlen beim klassischen ÖV denkbar, da Shuttle-Services aufgrund höherer Flexibilität mehr in Anspruch genommen werden. Auch könnte es sein, dass aufgrund von Sicherheitsbedenken autonome Fahrzeuge nicht angenommen werden.
- **Güterverkehr:** Als Chance kann, wie beim ÖV, auch beim Güterverkehr das Einsparungspotential von Fahrpersonal angesehen werden sowie, damit einhergehend, auch der Entfall von Lenk- und Ruhezeiten.
- **Energieverbrauch und Emissionen:** Eine Einsparung von Energie durch bessere Verkehrsabläufe und durch die Verringerung der Verkehrsleistung kann als Chance gesehen werden. Durch die mit alternativen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeuge können Luft- und Lärmemissionen reduziert werden. Gleichzeitig besteht das Risiko, dass durch die Übertragung von großen Datenmengen zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur auch mehr Energie in Anspruch genommen werden muss. Ein weiteres Risiko könnten mögliche gesundheitliche Auswirkungen der Datenübertragungstechnik (z. B. 5G) darstellen. Falls die Fahrleistungen möglicherweise steigen werden, bringt dies auch höhere Luft- und Lärmemissionen mit sich.
- **Erreichbarkeit und soziale Teilhabe:** Durch die bessere Erschließung von vormals unzureichend bedienten Gebieten durch autonome Shuttle-Dienste besteht die Chance, die soziale Teilhabe von Stadtbewohnenden zu stärken, da sie nicht mehr auf den privaten Pkw angewiesen sind. Gleichzeitig besteht auch das Risiko einer zunehmenden Zersiedelung aus der Stadt heraus, da Menschen mehr Mobilitätsangebote neben den privaten Pkw vorfinden. Durch den Wegfall

von etwaigem Fahrpersonal entstehen möglicherweise Nachteile für mobilitäts-eingeschränkte Personen, die persönliche Assistenz benötigen.

3.3 Aktuelle Anwendungsfälle automatisierter Verkehre

Die Dynamik bei der Entwicklung von automatisierten bzw. autonomen Fahrzeugen ist seit vielen Jahren hoch. Es herrscht ein Konkurrenzkampf unter den weltweit führenden Fahrzeugherstellern hinsichtlich neuer Technologien. Aufgrund der hohen technischen Komplexität der Fahraufgabe in innerörtlichen Netzen in Wechselwirkung mit der Infrastruktur, den anderen Verkehrsteilnehmenden sowie weiteren Rahmenbedingungen und auch den Herausforderungen hinsichtlich des rechtlichen Rahmens sind die Prognosen aktuell eher vorsichtig, wann in Deutschland autonome Fahrzeuge (SAE Level 4 und 5) im innerörtlichen öffentlichen Straßenverkehr eingesetzt werden können. (ADAC 2024)

Krail (2019) gibt einen Überblick über Szenarien einer Automatisierung der Kfz-Flotten für Pkws, Lkws und Busse. Basierend auf einer System-Dynamics Simulation schätzt er realistische technologische Entwicklungen ab und führt eine Potenzialanalyse mit dem Ergebnis durch, dass bis 2050 eine Durchdringung der Flotten durch Fahrzeuge der SAE Level 4 und 5 für Pkw mit 34 % bis 41 %, für Lkw mit 42 % bis 44 % und für Busse mit 48 % bis 67 % zu erwarten ist. Krail (2019) schätzt ab, dass bis 2050 nur maximal 7 % des Pkw-Bestandes fahrerlos und damit mit Stufe 5 ausgestattet sind. Andere Studien kommen zu ähnlichen Ergebnissen, erwarten zum Teil auch geringere Durchdringungsraten (siehe z. B. Prognos 2018; Trommer et al. 2017).

Rechtlicher Rahmen

Rechtlich gesehen waren lange Zeit in Deutschland nur Fahrzeuge bis zu Stufe 2, dem teilautomatisierten Fahren, zugelassen. Mit der Änderung des Straßenverkehrsgesetzes im Jahr 2017 ist es möglich geworden, dass auch Fahrzeuge mit Stufe 3 für den Straßenverkehr zugelassen werden können. Dies heißt konkret, dass unter bestimmten Voraussetzungen das Fahrzeug selbst die Fahraufgabe übernehmen darf. Ein Fahrer ist aber weiterhin notwendig. Seit Mai 2021 gibt es in Deutschland das neue Gesetz zum autonomen Fahren. Es ermöglicht, dass erstmals Fahrzeuge mit der Stufe 4 in festgelegten Betriebsbereichen im öffentlichen Straßenverkehr im Regelbetrieb fahren dürfen. (BMDV 2021)

Praxisbeispiele

In der Literatur wird hinsichtlich möglicher Einsatzbereiche für automatisierte bzw. autonome Fahrzeuge im Personenverkehr zwischen den folgenden zwei Einsatzbereichen unterschieden (Fraunhofer 2024, Kong et al. 2024):

- **Einsatzgebiet “shared autonomy”:** Dieses Einsatzgebiet umfasst automatisierte bzw. autonome Taxis und Busse, die im Sinne von “shared mobility” als gemeinschaftliches Verkehrsmittel genutzt werden. In den letzten Jahren ist die Anzahl an deutschen Kommunen mit Pilotprojekten zu autonom fahrenden Bussen erheblich gestiegen. Der Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) listet auf seiner Website aktuell rund 45 Kommunen mit Projekten zu autonomen Busverkehren (VDV o.J.). Die Pilotprojekte beschränken sich aktuell auf elektrisch betriebene Kleinbusse mit rund 6-10 Sitzplätzen. Diese werden auf fest definierten, zumeist kürzeren Linienabschnitten im Probefahrzeug z.T. mit Fahrgästen eingesetzt. Zunächst ist in den Fahrzeugen weiterhin Aufsichtspersonal vorhanden, welches in Notfällen die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen kann. Zukünftig ist dies aber nicht mehr vorgesehen. Die erste autonome Buslinie Deutschlands verkehrt laut Angaben der Deutschen Bahn seit 2017 in Bad Birnbach (DB o.J.). Eine weitere bekannte autonome Buslinie befindet sich in Monheim am Rhein (Stadt Monheim o. J.).
- **Einsatzgebiet “owned autonomy”:** Dieses Einsatzgebiet umfasst automatisierte bzw. autonome Fahrzeuge (Pkw), die privat genutzt werden. Aktuell gibt es in Deutschland unterschiedliche Beispiele von hochautomatisierten Assistenzsystemen für Pkw. Als erster Autohersteller weltweit hat Mercedes für den sogenannten Staupiloten eine Zulassung erhalten. Fahrende können dieses System bei Stau bis maximal 60 km/h einsetzen und sich dabei kurzzeitig komplett von der Fahraufgabe abwenden (Level 3). Der Autohersteller BMW setzt aktuell den sogenannten Autobahnpiiloten ein. Diese Assistenzsysteme übernehmen die Fahraufgabe auf der Autobahn bis zu einer Geschwindigkeit von maximal 130 km/h. Die fahrende Person muss aber weiterhin den Blick nach vorne richten und bei Bedarf jederzeit eingreifen können (SAE Level 2+). (ADAC 2024)

4 Entwicklung von Einsatzszenarien

Den Kern des Forschungsprojektes *NaMAV* bildete die Entwicklung von insgesamt drei Einsatzszenarien für die Stadt Leipzig. Hierbei fanden zum einen das gesammelte Wissen aus der Literaturrecherche als auch die Ergebnisse aus drei *NaMAV*-Zukunftslaboren mit dem Projektbeirat Anwendung.

4.1 NaMAV-Zukunftslabore

Im ersten *NaMAV*-Zukunftslabor im Juni 2021 entwickelten die Teilnehmenden in kleinen Gruppen mögliche Ideen für Einsatzszenarien automatisierter Mobilität für Leipzig im Jahr 2050. Die Teilnehmenden diskutierten mögliche Auswirkungen und entwickelten Lösungsansätze, wie sich schon heute auf wünschenswerte Einsatzszenarien vorbereitet werden kann. Gegliedert wurden die Szenarien in die vier Themenbereiche:

- Modifikation Straßenraum,
- neue Verkehrskonzepte,
- neue Verkehrsmittel und
- Wirtschaftsverkehr.

In der Diskussion zeigte sich, dass die Vereinbarkeit des Ziels nachhaltiger Mobilität im Sinne der Mobilitätsstrategie 2030 mit der Automatisierung im Verkehr eine Herausforderung, gleichzeitig aber auch eine Chance ist, wenn die neuen Technologien mit geeigneten Nutzungskonzepten kombiniert und gezielt gesteuert werden. Unter den Teilnehmenden bestand Konsens darin, dass sich hinsichtlich der im Projekt *NaMAV* entwickelten Ansätze zur Automatisierung des Verkehrs im Besonderen dem Thema "geteilte Mobilitätslösungen" (vgl. Einsatzgebiet "shared autonomy") gewidmet werden soll und darüber hinaus auch übergeordnete Ansätze zur Reduzierung des Kfz-Verkehrs untersucht werden sollten, die Menschen zu Verhaltensänderungen in ihrem individuellen Mobilitätsverhalten anregen sollen. Nur so könne das Ziel nachhaltiger Mobilität erreicht werden. Dieses wichtige Feedback wurde vom Projektteam aufgenommen und aktiv versucht, in den Szenarien zum Ausdruck zu bringen.

Im Anschluss an das erste *NaMAV*-Zukunftslabor, begann das Projektteam mit der Ausarbeitung eines ersten Einsatzszenarios zu "Autoarmen Quartieren". Dieses Szenario wurde im zweiten *NaMAV*-Zukunftslabor im September 2022 intensiv mit den Teilnehmenden diskutiert. Leitfragen waren:

- Wie können autoarme Zonen in Leipzig gestaltet werden, um deren Beitrag zu nachhaltiger Mobilität zu maximieren?
- Welche Schritte könnte man in Leipzig zur Umsetzung der autoarmen Zonen gehen?

Einen Monat später erfolgte im November 2022 das dritte *NaMAV*-Zukunftslabor zum Thema "Ridepooling-Gebiete in Leipzig 2050". Dieses Workshop-Format beschäftigte sich in besonderem Maße mit zukünftigen (automatisierten) Lösungen im Bereich der

geteilten Mobilitätsangebote. Die Leipziger Verkehrsbetriebe stellten im Rahmen eines Impulsbeitrages den On-demand-Service Flexa vor. Diskutiert wurde zu folgenden Leitfragen:

- Welche Beiträge leistet Flexa heute für nachhaltige Mobilität und städtebauliche Qualitäten?
- Wie können konkrete Szenarien für ein Ridepooling in Leipzig aussehen?

Die Erkenntnisse aus diesem Workshop wurden für das zweite Einsatzszenario "Flexible Angebote im öffentlichen Verkehr" genutzt.

4.2 Beschreibung der Einsatzszenarien

Im Rahmen des Projektes *NaMAV* wurden insgesamt drei Einsatzszenarien für die Stadt Leipzig erarbeitet, die in diesem Kapitel kurz in qualitativer Art und Weise eingeführt werden. Auf die konkrete modellierungstechnische Umsetzung der Szenarien mit der Verkehrssimulationssoftware MATSim wird im Kapitel 5 vertieft eingegangen.

Die im Projekt *NaMAV* entwickelten Szenarien können wie folgt beschreiben werden (Krombach et al. 2024):

- **Szenario 1 („Autoarme Quartiere“):** Dieses Szenario ist für die lokalen Akteur:innen im Kontext der in Leipzig beschlossenen Mobilitätsstrategie 2030, insbesondere in Bezug auf das Nachhaltigkeitsszenario (Stadt Leipzig 2017) von besonderem Interesse. Es soll explizit mit diesem Szenario der Umweltverbund gestärkt werden. Im Kern geht es bei diesem Szenario darum, sogenannte "autoarme Quartiere" in ausgewählten Bereichen der Stadt zu definieren. Diese Quartiere dürfen weder vom motorisierten Individualverkehr befahren noch beparkt werden. Ausnahmen bilden Lieferverkehre und besondere Fahrten, beispielsweise von Personen mit Mobilitätseinschränkungen. Die Szenariokonzeption basiert auf dem Prinzip der 15-Minuten-Stadt (vgl. Pozoukidou & Chatziyiannaki 2021). Ein Gebiet wird als autoarmes Gebiet definiert, wenn auf einer Fläche von 90% des Gebietes die folgenden sechs Bedarfe: Mobilität, Freizeit, Bildung, Naherholung, Nahversorgung und Gesundheit innerhalb von maximal 15 Minuten zu Fuß erreichbar sind.

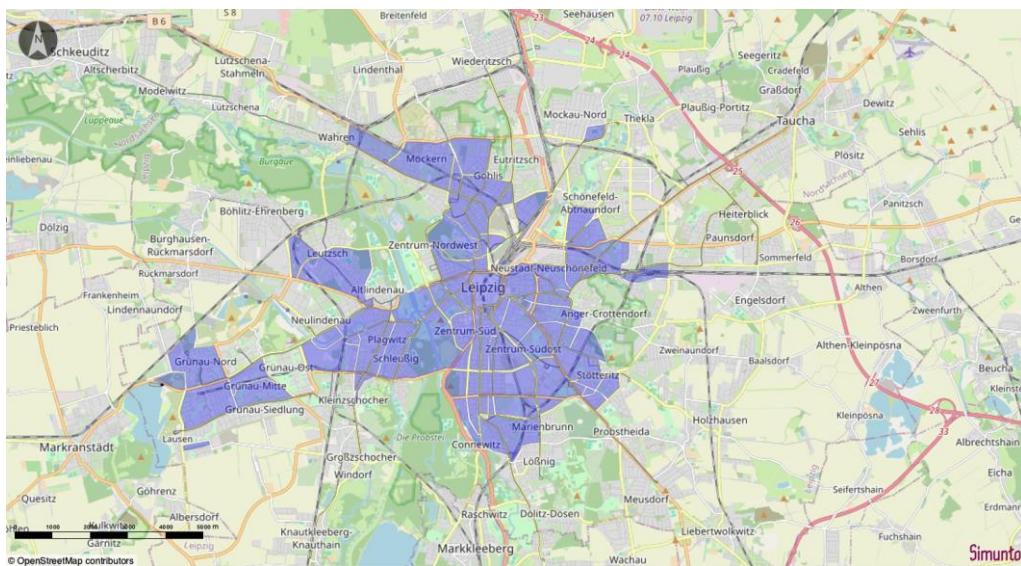


Abbildung 4: Visualisierung der Autoarmen Quartiere im Projekt NaMAV. (Quelle: Eigene Darstellung, unter Verwendung von Daten von OpenStreetMap sowie der Software Simunto VIA)

- **Szenario 2 („Flexible Angebote im öffentlichen Verkehr“):** In diesem wird sich mit der Ausweitung des On-demand-Services „Flexa“ der Leipziger Verkehrsbetriebe auseinander gesetzt. Im Speziellen wird untersucht, wie eine mögliche Ausweitung von „Flexa“ zu einem bedarfsgerechten Mobilitätsangebot (DRT = demand responsive transit) in Form von autonomen Shuttles aussehen könnte. Damit adressiert dieses Szenario im besonderen Maße den Automatisierungsaspekt im Forschungsprojekt. Ziel des Flexa-Services ist das Bedienen der ersten bzw. letzten Meile, spricht die Zu- und Abgangswege von klassischen ÖV-Angeboten wie beispielsweise Bus und Straßenbahn (LVB 2024).
- **Szenario 3 („Geschwindigkeitsreduktion“):** Dieses Szenario beschreibt im Detail, was passieren würde, wenn man die zulässige Geschwindigkeit des motorisierten Individualverkehrs auf dem gesamten städtischen Straßennetz um 40 % reduzieren würde. Autobahnen und Bundesstraßen sind in diesem Szenario von der Geschwindigkeitsreduktion ausgenommen. Das Szenario ist unabhängig zur Automatisierungsthematik zu sehen.

5 Modellierung der Einsatzszenarien

Das folgende Kapitel geht auf das im Rahmen des Projekts erstellte Verkehrsmodell ein. Besonderer Fokus liegt hierbei auf der Erstellung des Basismodells, das die Grundlage der Untersuchungen bildet und die Übersetzung der zuvor in Kapitel 4 beschriebenen Einsatzszenarien in das Modell.

5.1 Entwicklung eines kostengünstigen und auf andere Regionen übertragbaren Modellerstellungsprozesses

Um die Einsatzszenarien zu untersuchen, ist die Erstellung eines sogenannten Basis-Modells notwendig. Dieses soll den aktuellen Zustand des Leipziger Verkehrssystems widerspiegeln.

Ein Ziel des Projektes war es, einen kostengünstigen und auf andere Regionen übertragbaren Modellerstellungsprozesses zu entwickeln.

Um dieses Ziel zu erreichen, sind folgende Entwicklungen im Rahmen des Forschungsprojektes entstanden, die auch für andere Regionen Anwendung finden können:

- Die Erstellung eines MATSim scenario-template (<https://github.com/matsim-scenarios/matsim-scenario-template>). Dieses gibt Nutzer:innen eine Struktur vor, mit den notwendigen Software-Dependencies und Klassen, die für ein MATSim Scenario notwendig sind. Darauf aufbauend können detaillierte Entwicklungen vorgenommen werden. Das MATSim Lausitz, das MATSim Mexico-City und das MATSim Kyoto Modell nutzen dieses Template bereits.
- Die Einführung von Makefiles, um notwendige Input-Daten der Simulation zu erstellen. Diese haben als Vorteil, dass die Programmschritte immer in der richtigen Reihenfolge durchlaufen, die Abhängigkeiten der Daten beachtet werden und damit insgesamt die Erstellung einfacher nachzuvollziehen ist und reproduzierbarer ist.² Hier wird aus den eingekauften Mobilfunkdaten und weiteren Datenquellen die synthetische Bevölkerung erzeugt. Das Verkehrsangebot wird erstellt aus OpenStreetMap Daten und GTFS Daten. Die Funktionalitäten, um Angebot und Nachfrage zu erzeugen, sind in der MATSim Application gebündelt.³
- In MATSim ist die freie Geschwindigkeit definiert als die Höchstgeschwindigkeit, die Fahrzeuge auf der Kante fahren dürfen (Rieser et al. 2016). Dies entspricht meist nicht der zulässigen Geschwindigkeit auf einer Strecke, da standardmäßig Lichtsignalanlagen und Kreuzungen nicht explizit modelliert werden. Um den-

² <https://github.com/matsim-scenarios/matsim-leipzig/blob/main/Makefile>

³ <https://github.com/matsim-org/matsim-libs/tree/master/contribs/application>

noch realistische Geschwindigkeiten zu erhalten, muss die zulässige Geschwindigkeit auf einer Strecke reduziert werden. Um geeignete Faktoren zu erhalten, sind dieser anhand von realen Punkt-zu-Punkt-Reisezeiten von Routing Diensten und der Anwendung von SUMO (Lopez et al. 2018) einer mikroskopischen Verkehrssimulation für 3 Regionale Typen (Metropole, Stadt, ländlicher Raum) bestimmt worden (siehe Rakow & Nagel 2024a).

- Um die Kalibrierung zu vereinfachen, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes die automatisierte Kalibrierung der "Alternative Specific Constants" (ASCs) angewandt und weiterentwickelt (Rakow & Nagel 2024b).
- Die Nachfrage des Wirtschaftsverkehrs ist im Modell enthalten (Ewert & Nagel 2023, Lu et al. 2022). Dabei ist an der Standardisierung der Erstellung der Nachfrage für Modelle in Deutschland im Rahmen des Projektes gearbeitet (<https://github.com/matsim-org/matsim-libs/tree/master/contribs/small-scale-traffic-generation>) worden.
- Zur Visualisierung von Simulationsläufen können nun vereinfacht automatisch interaktive Dashboards erzeugt werden, mithilfe der neuen MATSim Simwrapper Erweiterung (<https://github.com/matsim-org/matsim-libs/tree/master/contribs/simwrapper>). Diese können individuell angepasst werden oder es gibt ein Standard Dashboard, das die wesentlichen Ergebnisse der Simulation zusammenfasst.

5.2 Verknüpfung der Einsatzszenarien mit dem- Modellierungsgegenstand

In enger Absprache mit den Projektpartnern (TUD, Stadt Leipzig, TUB), wurden in wöchentlichen Online-Projektmeetings versucht, die in Kapitel 4 skizzierten Einsatzszenarien bestmöglich in MATSim zu integrieren.

Dies gestaltete sich als ein sehr aufwendiger Prozess. Um aus den planerischen Ideen konkrete Spezifikation für die Programmierung zu definieren, musste dieser Prozess iterativ sein. Dabei war das aktuelle Forschungsinteresse, die Interessen der Stadt als auch der Implementierungsaufwand zu berücksichtigen.

In diesem Prozess wurden immer wieder erste Zwischenergebnisse des Modelles präsentiert und ausgiebig diskutiert. Besondere Diskussionspunkte bestanden z.B. hinsichtlich Folgender Themen:

- Die Implementierung des Parkens (vgl. Kapitel 5.5). Dabei sind z. B. die Gebührenordnung und Daten über die Ausgestaltung der Parkzonen in Leipzig zu recherchieren und zu erstellen gewesen. Zusätzlich musste das Parkschema der Stadt verstanden werden, inklusive der planerischen Idee dahinter. Es war abzustimmen, wie die Übertragung in das Modell möglich ist.
- Wie die Daten der SrV, die von Seiten der TUD bereitgestellt wurden für die Kalibrierung des Verkehrsmodells auszuwerten sind.
- Der Übertragung des in Kapitel 4 entwickelten Ansatz der Gestaltung der autofreien Zonen in das Verkehrsmodell.

- Für die Kalibrierung des Flexa Services sind reale Daten genutzt worden. Dabei wurde sich über die Analyse der Daten und welche Kennzahlen zur Kalibrierung genutzt werden können ausgetauscht.

5.3 Aufbau eines multimodalen, dynamischen und agentenbasierten Verkehrsmodells

Dieses Kapitel beruht auf Rybczak et al. 2024a, Rybczak et al. 2024b und Krombach et al. 2024.

Das Verkehrsmodell umfasst den Personen- und Wirtschaftsverkehr. Die Personenverkehrsfrage des Verkehrssimulationsmodells das für die Stadt Leipzig erstellt wurde, ist aus einem deutschlandweiten Verkehrsmodell der Senozon Deutschland GmbH abgeleitet. Dieses stützt sich maßgeblich auf Mobilfunkdaten und repräsentiert einen typischen Wochentag (Neumann & Balmer 2020).

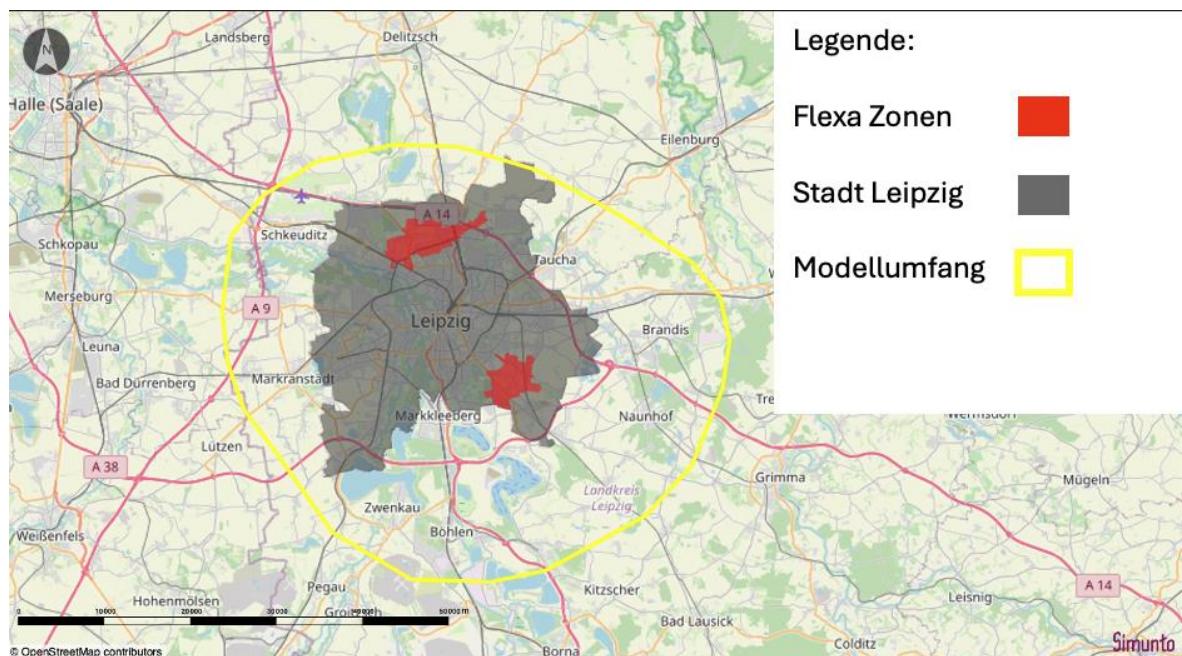


Abbildung 5: Untersuchungsgebiet (Quelle: Krombach et al. 2024)

Der Wirtschaftsverkehr im Leipziger Verkehrsmodell setzt sich aus zwei Modellen zusammen. Einem Modell für den kleinräumigen Wirtschaftsverkehr (Ewert & Nagel 2023) und einem deutschlandweiten Güterfernverkehrsmodell (Lu et al. 2022).

OpenStreetMap Daten bilden die Grundlage für das Straßenverkehrsnetz.⁴ Ein General Transit Feed Specification (GTFS) Datensatz, zur Verfügung gestellt von den Leipziger Verkehrsbetrieben (LVB), ist genutzt worden, um das Angebot des öffentlichen Verkehrs abzubilden.

Das entwickelte Basismodell umfasst insgesamt fünf Verkehrsmittel: Zu Fuß gehen, PKW als Fahrer:innen, PKW als Mitfahrer:innen, öffentliche Verkehrsmittel und Fahrrad.

Die Verkehrsbelastung im Basismodell ist in der Abbildung 6 dargestellt.

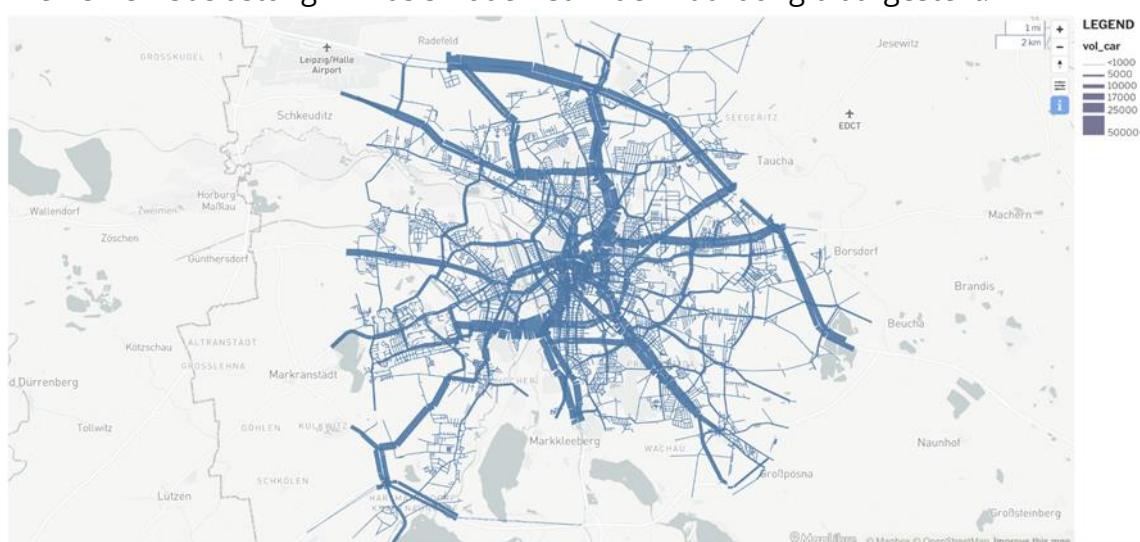


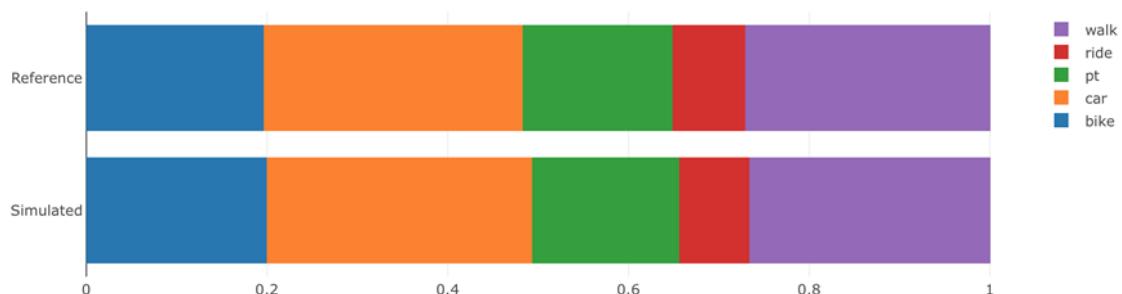
Abbildung 6: Verkehrsbelastung im Basismodell (Quelle: Eigene Darstellung)

⁴ <https://www.openstreetmap.org>

5.4 Kalibrierung und Validierung des Leipzig-Modells anhand von Erhebungsdaten

Grundlage der Kalibrierung des Verkehrsmodells bildeten die Daten der Mobilitätserhebung "Mobilität in Städten – SrV" (TU Dresden 2018, VTA Leipzig 2023). Der Modal Split und die nach Verkehrsmitteln differenzierte Distanzverteilung sind kalibriert. Der Modal Split stimmt mit den Werten aus der Mobilitätserhebung mit einer maximalen Abweichung von +/- 1 Prozentpunkt überein.

Modal Split



Modale Distanzverteilung

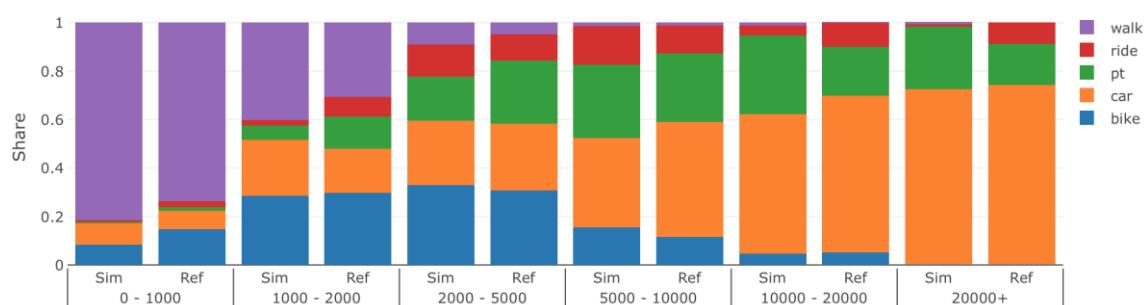


Abbildung 7: Modal Split und Modale Distanzverteilung der Simulation (Sim) und der Referenzdaten (Ref). (Quelle: Rybczak et al. 2024a, basierend auf den Daten von Mobilität in Städten - SrV (TU Dresden 2018))

Des Weiteren sind Verkehrszählungen der Dauerzählstellen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) aus den Jahren 2018 und 2019 zur Validierung verwendet worden (BASt o. J. b). Wie z. B. in der Abbildung 8 dargestellt, der Vergleich zwischen der Zählstelle Leipzig-Südwest und den Zählwerten der Simulation.

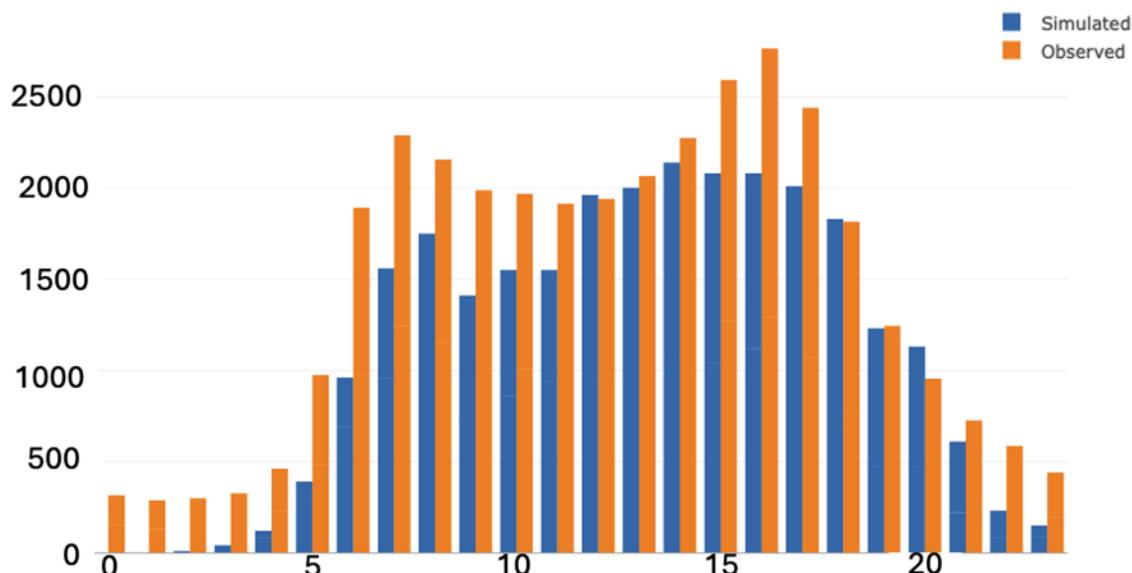


Abbildung 8: Vergleich zwischen den Verkehrsstärken der Simulation und den Zählwerten der Dauerzählstellen der BASt. (Quelle: Eigene Darstellung, basiert auf Daten der BASt (BASt o. J. b))

Außerdem erfolgte ein Vergleich der simulierten Reisezeiten mit den Ergebnissen von Routingdiensten (hier: Google Maps⁵, TomTom⁶, HERE API⁷ und Mapbox⁸). Die Abbildung 9 zeigt, dass die simulierten Geschwindigkeiten innerhalb eines plausiblen Bereiches liegen.

⁵ <https://developers.google.com/maps/documentation/routes/overview>

⁶ <https://www.tomtom.com/>

⁷ <https://developer.here.com/>

⁸ <https://www.mapbox.com/matrix-api>

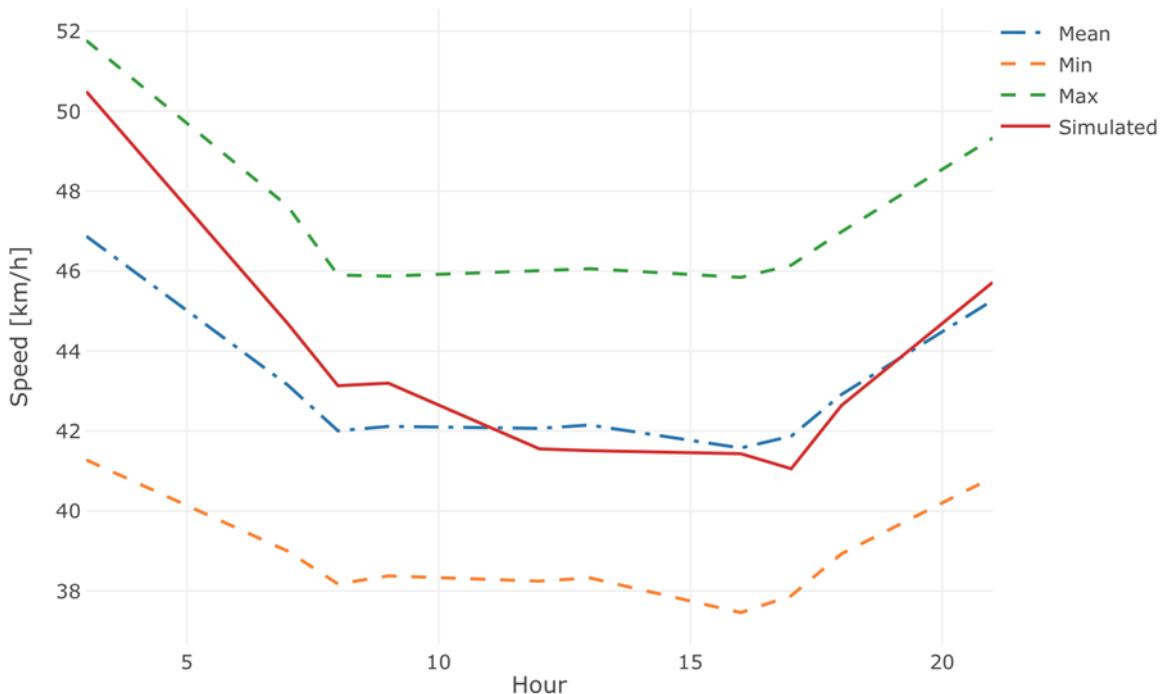


Abbildung 9: Vergleich der Geschwindigkeiten zwischen Simulation und Routingdiensten. (Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus der Simulation und siehe Text)

5.5 Erweiterung fehlender Funktionalitäten innerhalb der Verkehrssimulationssoftware MATSim

Parken

Dieser Abschnitt beruht auf Rybczak et al. 2024a.

Da autofreie Zonen in Wechselwirkung mit dem Parkverhalten in Leipzig stehen, muss die Modellierung des Parkverhaltens besser verstanden werden. Dies zeigte sich im Projektverlauf. Die Stadt Leipzig verwendet – wie viele andere deutsche Städte auch – Bewohnerparkzonen (in Leipzig definiert als Zonen, in denen nur Bewohner:innen parken dürfen, aber eine jährliche Gebühr entrichten müssen) als Instrument zur Steuerung der Verkehrsnachfrage. Im Rahmen des Projektes sind die Parkgebühren Leipzigs in das MATSim Leipzig Szenario integriert worden.

Es wird unterschieden zwischen den Parkkosten, die je Parkdauer anfallen innerhalb einer Zone mit Parkraumbewirtschaftung und den Parkkosten innerhalb einer Bewohnerparkzonen für die Bewohner:innen.

Eine Herausforderung in Leipzig bestand darin, dass in Leipzig das Nicht-Anwohner:innen-Parken auf öffentlichen Straßen in solchen Zonen überhaupt nicht erlaubt ist. Während Bewohner:innen auf der Kante ihrer Wohnaktivität parken können, können Nicht-Bewohner:innen nur außerhalb der Zone parken und müssen dann zu Fuß zu ihrem endgültigen Ziel gehen.

Dies war in MATSim nicht auf einfache Art zu lösen, da in MATSim entweder eine Kante vollumfänglich für Autos zur Verfügung steht, oder eben nicht. Kanten, auf denen zwar gefahren werden kann, die aber für einen Teil der Autofahrer:innen (nämlich für Nicht-Anwohner:innen) nicht begrenzt werden können, waren in MATSim bisher nicht vorgesehen. Dies wurde durch die Entwicklung eines Leipzig spezifischen Routing Algorithmus gelöst.

DRT Estimation

Das Einsatzszenario 2 betrachtet die möglichen Folgen einer Ausweitung von „Flexa“, einem bedarfsgesteuerten Mobilitätsdienst, der derzeit in zwei Vororten von Leipzig verkehrt (LVB 2024).

Aufgrund der kleinen Flexa Flotte führte der Standard-DVRP-Ansatz von MATSim (Maciejewski 2016) zu einer unrealistischen Einschätzung der Leistung des DRT (= demand responsive transit) Systems. Auf der Grundlage der realen Betriebsdaten ist ein Modell für die Schätzung der Fahrzeit entwickelt worden. Dieses Modell wird in der MATSim-Verkehrssimulation verwendet, um eine realistische Schätzung der Reisezeit mit dem DRT-Modus zu erhalten.⁹ (Lu & Nagel 2024a, Rybczak et al. 2024b)

⁹ <https://github.com/matsim-org/matsim-libs/tree/master/contribs/drt/src/main/java/org/matsim/contrib/drt/estimator>

6 Implementierung und Simulation der Einsatzszenarien

Das gesamte Verkehrsmodell, also die Input Dateien und der Quellcode sind öffentlich verfügbar und nutzbar.¹⁰

Zusätzlich sind im Rahmen des Forschungsprojektes die Open-Source Verkehrssimulationssoftware MATSim verwendete und weiterentwickelte Funktionen nutzbar. Somit können diese Erweiterungen und Verbesserungen in weiteren Forschungsprojekten wiederverwendet und weiterentwickelt werden, und finden bereits in anderen Forschungsprojekten Einsatz.

6.1 Implemetierung

Die in AP2 definierten Einsatzszenarien werden in das Basismodell integriert. Das Folgende Kapitel basiert auf Rybczak et al. 2024b.

Szenario 1: Autoarme Quartiere

Die Implementierung einer autofreien Zone in MATSim ist einfach: Befindet sich eine Kante innerhalb einer der definierten autofreien Zonen (siehe Abbildung 4), ist die Einfahrt für Autos verboten. Personen, die dennoch ein Auto verwenden wollen, müssen dieses auf der nächstgelegenen Autokante parken und den Rest zu Fuß gehen. Die Ausgestaltung der Zonen ist dem Kapitel 4 zu entnehmen.

Szenario 2: Ausweitung des DRT Service

Dieses Einsatzszenario betrachtet die möglichen Folgen einer Ausweitung von „Flexa“, einem bedarfsgesteuerten Mobilitätsdienst. Dieser wird derzeit in zwei Vororten von Leipzig betrieben (LVB 2024). Die beiden bestehenden Flexa-Verkehrsgebiete im Norden und Südosten von Leipzig (siehe Abbildung 10) wurden in das Basismodell integriert.



Abbildung 10: Bediengebiet „Flexa“ (Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Daten der LVB)

¹⁰ Quellcode: <https://github.com/matsim-scenarios/matsim-leipzig>

Input Dateien: <https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/matsim/scenarios/countries/de/leipzig/leipzig-v1.3/input/>

Das Modell ist auf der Grundlage realer Daten kalibriert nach dem in Kapitel 5.5 beschriebenen Ansatz. Dazu gehören die Anzahl der Flexa-Fahrten pro Tag, die durchschnittliche Fahrtzeit und die Entfernung der Fahrten. Im Maßnahmenfall ist das Bedienungsgebiet auf die gesamte Stadt ausgedehnt. Die Scoring-Parameter der DRT-Service-Kalibrierung bleiben dabei unverändert.

Szenario 3: Geschwindigkeitsreduktion

Das letzte Einsatzszenario „Geschwindigkeitsreduktion“ beinhaltet, dass die Geschwindigkeiten des motorisierten Verkehrs im gesamten Verkehrsnetz der Stadt Leipzig um 40 % reduziert werden. Dies orientiert sich an der planerischen Idee der Herabsetzung des Tempolimits von 50 km/h auf 30 km/h. Ausgenommen hiervon sind alle Verbindungen, die auf OpenStreetMap als „Fernstraße“ (trunk) oder „Autobahn“ (motorway) klassifiziert sind.

6.2 Simulationsergebnisse

Szenario 1: Autoarme Quartiere

Das linke Diagramm in der Abbildung 11 verdeutlicht die Veränderung des Modal Split der Bewohner:innen der Stadt Leipzig als Folge der Einführung der autoarmen Quartiere. Eine deutliche Reduktion der mit dem PKW (als Fahrer:innen) zurückgelegten Wege um 3,5 Prozentpunkte (von 29,4% auf 25,9%) ist sichtbar.

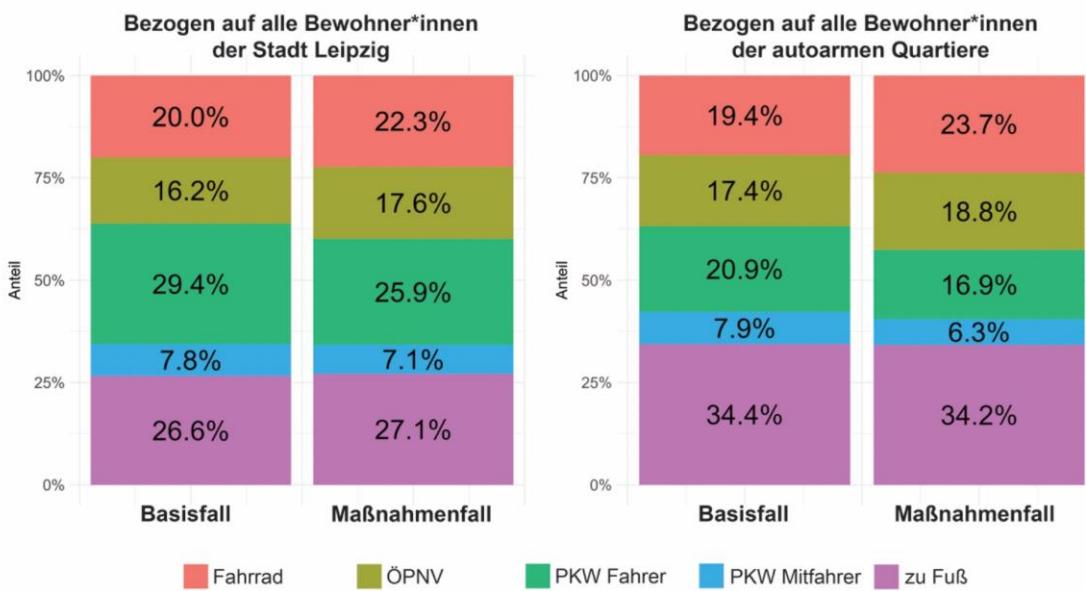


Abbildung 11: Verkehrsmittelwahl der Maßnahme „autoarme Quartiere“ jeweils verglichen mit dem Basisfall. (Quelle: Krombach et al. 2024)

Es findet eine Umverteilung der Fahrten statt: Zum einen auf das Fahrrad, dessen Anteil um 2,3 Prozentpunkte steigt, zum anderen auf den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV). Mit diesem werden nun 1,4 Prozentpunkte mehr Wege zurückgelegt.

Betrachtet man nur die Bewohner:innen der autoarmen Quartiere (Abbildung 11, rechts), dann ist die Veränderung im Modal Split größer, weil die Betrachtung sich auf durch die Maßnahme stärker betroffene Personen fokussiert. Der Anteil der mit dem PKW (als Fahrer:innen) zurückgelegten Wege ist schon im Basisfall geringer als in der gesamten Stadt und geht durch die Einführung der autoarmen Quartiere im Vergleich zum Basisfall um 4 Prozentpunkte zurück (Stadt Leipzig: 3,5 Prozentpunkte). Wege, die mit dem Fahrrad zurückgelegt werden, steigen um 4,3 Prozentpunkte (Stadt Leipzig: 2,3 Prozentpunkte). Der Anteil der Wege, die mit dem ÖPNV zurückgelegt werden, steigt wie in der gesamten Stadt um 1,4 Prozentpunkte. Erwartungsgemäß lässt sich feststellen, dass sich kürzere Wege mit bis zu 5 km Distanz besonders stark auf das Fahrrad verlagern. Für Wege auf den Distanzen zwischen 5 und 20 km steigt insbesondere der Anteil der Wege die mit dem öffentlichen Verkehr zurückgelegt werden.

Szenario 2: Ausweitung des DRT Service

Die Resultate der Simulationen zeigen, dass bei einer Ausweitung des Flexa-Dienstes auf das gesamte Stadtgebiet an einem durchschnittlichen Wochentag etwa 13.300 Flexa-Fahrten durchgeführt werden würden. Dies entspricht einem Modal-Split-Anteil von 0,7 %. Die in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass ein Großteil der Fahrten, die aktuell mit dem Flexa-Dienst durchgeführt werden, im Basisfall mit dem PKW (einschließlich Mitfahrern und Mitfahrerinnen im PKW) oder mit öffentlichen Verkehrsmitteln durchgeführt wurden. Da es sich bei der Kategorie "im PKW als Mitfahrer:in" oft um Hol- und Bringfahrten handelt, könnten diese gut durch einen DRT-Service ersetzt werden.

Es wäre eine Flexa-Flotte von 200 bis 250 Fahrzeugen erforderlich, um die prognostizierte Nachfrage bedienen zu können. Es ist zu erwähnen, dass die Nachfragevorhersagen für solche flexible Bediensysteme derzeit sehr ungenau sind, da die Modelle sehr sensibel auf Preisänderungen reagieren.

Ursprüngliches Verkehrsmittel	Prozent
Fahrrad	11,1 %
ÖPNV	29,7 %
PKW Fahrende	10,3 %
PKW Mitfahrende	34,8 %
Zu Fuß	14,2 %

Tabelle 1: Ursprüngliche Verkehrsmittel der Wege, die in der Simulation auf den stadtweiten Flexa-Nachfrageservice umsteigen (Quelle: Krombach et al. 2024, Datenquellen siehe Text)

Szenario 3: Geschwindigkeitsreduktion:

Durch die Geschwindigkeitsreduzierung des motorisierten Individualverkehrs ergibt sich die in der Abbildung 12 dargestellten Veränderungen des Modal Split der Einwohner:innen der Stadt Leipzig.

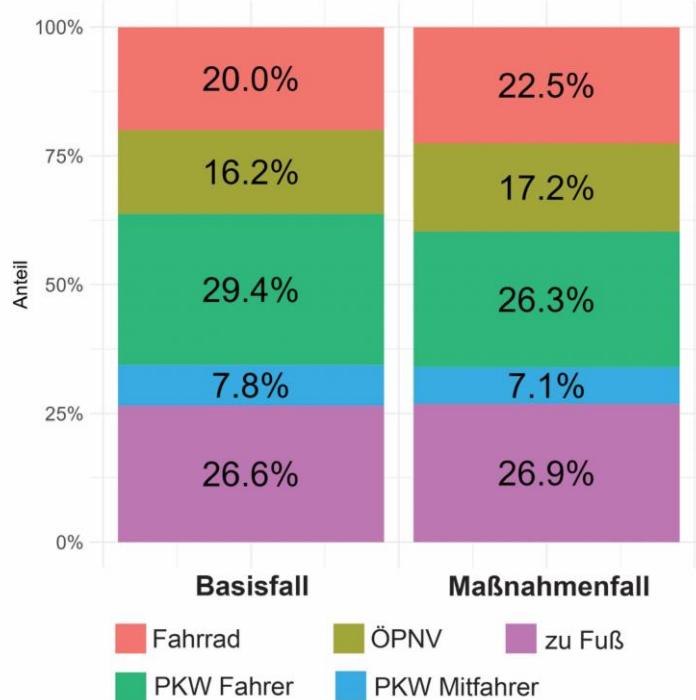


Abbildung 12: Verkehrsmittelwahl der Maßnahme "Geschwindigkeitsreduktion" (rechts), verglichen mit dem Basisfall (links), bezogen auf alle Bewohner:innen der Stadt Leipzig. (Quelle: Krombach et al. 2024, Datenquellen siehe Text)

Der Anteil des Pkw als Fahrer:innen geht um knapp 3 Prozentpunkte zurück. Der Abbildung 12 ist zu entnehmen, dass nun mehr Wege mit dem Fahrrad (+2,5 Prozentpunkte) und dem ÖV (+1 Prozentpunkt) zurückgelegt werden.

Eine detaillierte Analyse der Fahrten im Modell zeigt, dass die durchschnittlichen Distanzen und Fahrzeiten mit dem PKW zunehmen. Diese Entwicklung lässt sich dadurch erklären, dass bei kurzen Distanzen und Fahrzeiten infolge der Reduktion der Geschwindigkeit im MIV, vermehrt auf alternative Verkehrsmittel zurückgegriffen wird.

Weitere Analysen sind hier auf interaktiven Dashboards dargestellt:
<https://simwrapper.github.io/site/public/de/leipzig/projects/namav/v1.3.1>

7 Bewertung der Einsatzszenarien

Um einen geeigneten Vergleich zwischen den drei Einsatzszenarien zu ermöglichen, wurde sich intensiv mit einem geeigneten Bewertungssystem auseinander gesetzt. In diesem Kapitel wird zunächst die Herleitung des Bewertungssystems beschrieben. Danach wird auf die individuellen Bewertungen der einzelnen Szenarien eingegangen.

7.1 Leitbild nachhaltiger Mobilität

Das Leitbild nachhaltiger Mobilität wurde für *NaMAV* anhand der folgenden Kriterien operationalisiert, welche in drei Gruppen gegliedert werden (Krombach et al. 2024):

- **Sicherstellung des Zugangs zu relevanten Zielen (Personen und Güter)**
 - Kurze Distanzen zu relevanten Zielen (Erreichbarkeiten)
 - Zuverlässige, sichere, komfortable Verkehrsangebote zum Erreichen der Ziele (Infrastruktur, Betrieb)
 - Bezahlbarkeit Mobilität, Barrierefreiheit
- **Lebendige Straßen und öffentliche Räume**
 - Umfang an Flächen für Aufenthalt (Quantität)
 - Hohe Aufenthaltsqualitäten öffentlicher (Straßen-) Räume
- **Einhaltung der Grenzen negativer Auswirkungen im Verkehr**
 - Vision Zero (keine Getöteten, keine Verletzten mit lebenslangen Beeinträchtigungen)
 - Senkung Treibhausgasemissionen
 - Körperliche Bewegung durch Fuß-/Radverkehr zur Einhaltung der WHO-Vorgaben (WHO 2020)
 - Begrenzung Auswirkungen in den Bereichen Luftschadstoff-/ Lärmemissionen, Flächeninanspruchnahme

7.2 Vorstellung des Bewertungssystems

Wie bereits oben erwähnt, wurde für die Bewertung der entwickelten Einsatzszenarien das Leitbild nachhaltiger Mobilität in Kombination mit dem Ziel städtebaulicher Qualitäten herangezogen (Krombach et al. 2024):

- Sicherstellung des Zugangs zu relevanten Zielen (Personen und Güter)
- Lebendige Straßen und öffentliche Räume
- Einhaltung der Grenzen negativer Auswirkungen im Verkehr

Die Abbildung 13 zeigt eine qualitative Bewertung der verschiedenen Szenarien. Die Pfeilrichtung zeigt an, ob eine Reduktion, ein Gleichbleiben oder ein Anstieg eines jeweiligen Bewertungsaspekts vorliegt. Ein besonders starker Effekt wird dabei mit einem doppelten Pfeil angegeben. Pfeile mit grüner Füllung geben positiv bewertete Entwicklung an und Pfeile ohne Füllung kennzeichnen eine neutrale Entwicklung. (Krombach et al. 2024)

Bei einem Pfeil mit schwarzer Kontur wurde die Bewertung direkt anhand der in MATSim durchgeführten Simulation abgeleitet. Bei einer hellblauen Kontur wurde die Bewertung indirekt aus den MATSim Simulationen abgeleitet.

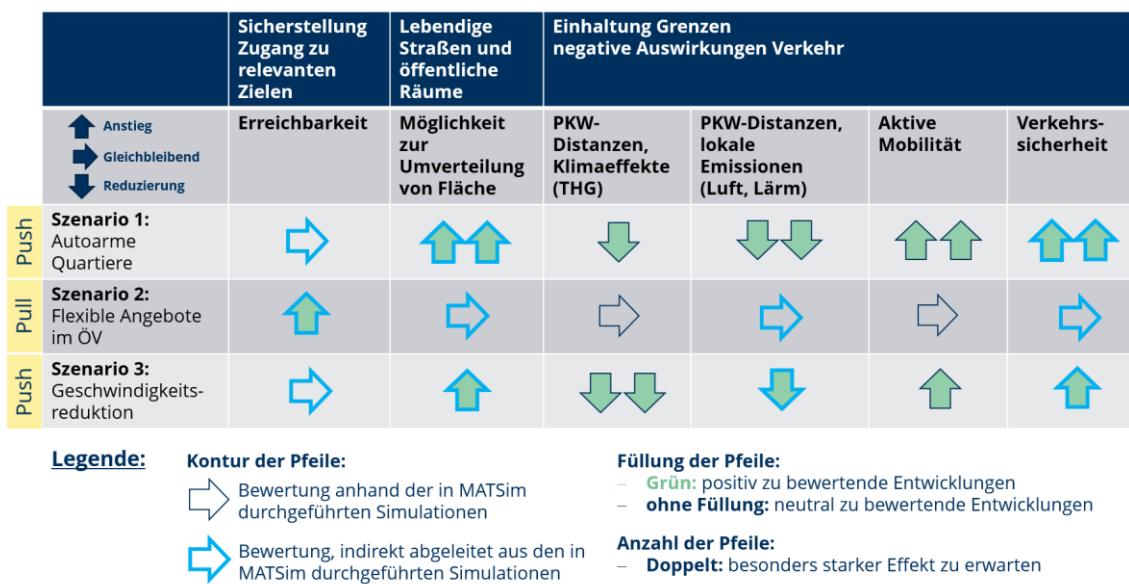


Abbildung 13: Bewertung der drei Einsatzszenarien (Quelle: Krombach et al. 2024)

7.3 Bewertung

Beim Thema Erreichbarkeit führt das Szenario 2 zu einer Verbesserung im Vergleich zu Szenario 1 und 3. Dies ist daher zu begründen, da in Szenario 2 das ÖV-Angebot, insbesondere in der Stadtrandlage verbessert wird. (Krombach et al. 2024)

In der Kategorie Lebendige Straßen und öffentliche Räume punktet deutlich das Szenario 1, das durch die Reduzierung von Fahrbahn- und Parkflächen, zusätzliche Aufenthaltsflächen und Flächen für Begrünung geschaffen werden. Auch das Szenario 3 führt zu positiven Entwicklungen, denn durch die Reduzierung der Geschwindigkeit gleichen sich die Geschwindigkeiten zwischen Kfz- und Radverkehr mehr an. Dies erleichtert in Straßen eine Führung im Mischverkehr, was wiederum neue Spielräume zur Umverteilung von freiwerdenden Flächen ermöglicht. Ebenfalls können Straßenquerschnitte bei geringeren Geschwindigkeiten auch in der Breite verkleinert werden, was ebenfalls zu Flächengewinnen zu zugunsten des Fußverkehrs führen kann. (Krombach et al. 2024)

In Bezug auf das Themenfeld „negative Auswirkungen des Verkehrs“ kann resultiert werden, dass das Szenario 3 die größten Reduktionen hinsichtlich der Treibhausgasemissionen (THG) mit sich bringt. Dies ist damit zu begründen, da bei diesem Szenario eine deutliche Reduktion von Pkw-Distanzen über ganz Leipzig stattfindet. Bei den Luft- und Lärmemissionen auf Quartiersebene (lokale Ebene) ist bei Szenario 1 die stärkste Reduktion zu erwarten, da die autoarmen Quartiere eine starke Reduktion der Kfz-Verkehre bewirken. Das Szenario 1 schneidet auch in Bezug auf eine Anreizsetzung zu mehr aktiver Mobilität sowie beim Thema Verkehrssicherheit am besten ab. Es zeigt sich in den durchgeföhrten Simulationen, dass dieses Szenario zu einer deutlichen Erhöhung der Fußverkehrs- und Radverkehrsanteile führt. (Krombach et al. 2024)

8 Handlungsempfehlungen und Ausblick

Mit dem Projekt *NaMAV* konnten für die Stadt Leipzig drei zukünftige Einsatzszenarien erarbeitet, in MATSim simuliert und abschließend bewertet werden. Auf Basis der Projektergebnisse sollen in diesem Kapitel abschließend Handlungsempfehlungen sowohl konkret für die Stadt Leipzig als auch Erkenntnisse für andere urbane Räume abgeleitet werden.

Wie in Abbildung 13 dargestellt, lassen sich die drei Einsatzszenarien jeweils Pull- und Push-Maßnahmen zuordnen:

- Szenario 1 (Autoarme Quartiere): Push-Maßnahme
- Szenario 2 (Flexible Angebote im ÖV): Pull-Maßnahme
- Szenario 3 (Geschwindigkeitsreduktion): Push-Maßnahme

Pull-Maßnahmen beschreiben Ansätze, die erwünschte Verkehre (z.B. Umweltverbund) fördern. Ein Beispiel für eine Pull-Maßnahme ist der Ausbau des ÖV-Angebots. Pull-Maßnahmen hingegen zielen auf restriktive Ansätze ab, die zur De-Attraktivierung unerwünschter Verkehre (z.B. Kfz-Verkehr) führen sollen. Ein Beispiel für eine Pull-Maßnahme für den Fußverkehr ist die Umverteilung von Straßenfläche zugunsten des Fußverkehrs; Parkraummanagement für den motorisierten Individualverkehr ist ein Beispiel für eine Push-Maßnahme für den MIV. (Krombach et al. 2024)

Die Szenarien 1 und 3 sind Push-Maßnahmen, da sie restriktive Elemente haben. So herrscht beispielsweise ein Kfz-Fahrverbot in autoarmen Quartieren. Das Szenario 2 ist hingegen eine Pull-Maßnahme, da durch die Verbesserungen des flexiblen ÖV-Angebots versucht wird, ein umweltfreundlicheres Mobilitätsverhalten in der Stadtbevölkerung anzuregen. (Krombach et al. 2024)

Es zeigt sich grundsätzlich, dass eine alleinige Umsetzung von Pull-Maßnahmen, wie beispielsweise ein alleiniges Umsetzen von Szenario 2, nicht ausreichend ist, wenn das Ziel nachhaltiger Mobilität erreicht werden soll. Es benötigt vielmehr das Zusammenspiel zwischen Pull- und Push-Maßnahmen, damit auch ausreichende Akzeptanz erzielt werden kann. (Krombach et al. 2024)

Folgende Handlungsempfehlungen werden für die Stadt Leipzig abgeleitet (Krombach et al. 2024):

1. Das Szenario 1 (Autoarme Quartiere) bewirkt deutliche positive Effekte zur Steigerung nachhaltiger Mobilität. Bei der Implementierung der autoarmen Quartiere sind keine unzumutbaren Defizite in der Verkehrsqualität des MIV entstanden. Umwege des MIV durch etwaiges Umfahren von autoarmen Quartieren werden durch eine veränderte Verkehrsmittelwahl in Richtung Umweltverbund überkompensiert. Die im MIV zurückgelegten Distanzen sinken im Vergleich zum Basisfall.
2. Ein Weiterführen bzw. der Ausbau von „Flexa“ zu einem noch flexiblen ÖV-Angebot (Szenario 2), welches auf klassische linien- und fahrplangebundende

ÖV-Angebote (z.B. Bus und Straßenbahn) abgestimmt ist, wird empfohlen. Der Umstieg auf automatisierte bzw. autonome Fahrzeuge schafft das Potential, Fahrpersonal zu ersetzen. Eine Abstimmung der linien- und fahrplanbasierten und der nutzer:innengesteuerten Angebote ist dabei notwendig.

3. Die geringeren Geschwindigkeiten (Szenario 3), im Besonderen bei einer Differenzierung zwischen ÖV und MIV (soweit möglich), schaffen Potenzial zur Verlagerung von MIV-Wegen auf den Umweltverbund. Sie erleichtern darüber hinaus auch die Einführung automatisierter Verkehre aufgrund geringerer Geschwindigkeitsdifferenzen im Mischverkehr mit konventionellen Fahrzeugen, kürzeren notwendigen Sichtweiten und Anhaltewegen.
4. Die Einführung von Vorrangnetzen für automatisierte Verkehre, mit zuverlässiger umfassender Markierung, Trennung Rad- vom Kfz-Verkehr und geringen Geschwindigkeiten machen ein frühes Testen automatisierter Fahrzeuge möglich. Vorbilder sind hierbei beispielsweise das ABSOLUT-Projekt¹¹ oder das Kel-Ride-Projekt¹².
5. Eine Kombination von Elementen der Szenarien 1 bis 3 als Kombination von Push- und Pull-Maßnahmen ermöglicht insgesamt ein hohes Potenzial zur Unterstützung der für das Projekt NaMAV formulierten Ziele nachhaltiger Mobilität und städtebaulicher Qualitäten. Gleichzeitig kann durch die Pull-Komponenten die notwendige Akzeptanz zur Umsetzung erzielt werden.

Durch das Projekt NaMAV wurden Potenziale zur Umverteilung von Flächen weg vom motorisierten Individualverkehr identifiziert. Diese können in weiterführender Forschung genauer ausgestaltet werden. Visualisierungen, wie sie im Rahmen des Projektes durch den Grafiker Bertil Bahm erstellt wurden (vgl. Abbildung 14), zeigen mögliche Ideen für zukünftige Gestaltungen von Straßenräumen mit mehr Fläche für Zufußgehende und mit höherer Aufenthaltsqualität. Die Visualisierungen zeigen auf anschauliche Weise die Qualitäten in den Straßenräumen auf und können somit die Akzeptanz für Umgestaltungen erhöhen.

¹¹ <https://absolut-projekt.de>

¹² <https://kelride.com/>



Abbildung 14: Visualisierung einer Quartiersstraße vor und nach einer Umgestaltung
(Quelle: Bertil Brahm)

Die im Projekt *NaMAV* erzielten Ergebnisse zeigen sich insgesamt als plausibel. Das Modellinstrumentarium, inklusive der im Rahmen des Projektes erarbeiteten Erweiterungen, hat sich bewährt. Das öffentlich verfügbare MATSim-Modell für die Stadt Leipzig ist eine gute Grundlage für weitere Forschungsarbeiten und ermöglicht die Implementierung und Simulation von weiteren möglichen Zukunftsszenarien nachhaltiger Mobilität. Da die im Projekt erstellten Szenarien öffentlich verfügbar sind, können sie auch anderen Städten als Inspiration dienen und möglicherweise Anwendung in deren Verkehrsmodell finden. Ein Beispiel mit hoher Übertragbarkeit auf andere urbane Räume stellt das Szenario "Autoarme Quartiere" dar. Mit der Anwendung des im Projekt gewählten Ansatzes der Abgrenzung von autoarmen Zonen können auch weitere Städte Potentiale für autofreie Quartiere aufzeigen.

Zusammenfassend zeigt sich somit eine hohe Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dem Projekt. Generell unterstützen die Szenarien das Ziel nachhaltiger Mobilität mit und ohne Automatisierung. Sie sind daher flexibel nutzbar für Szenarien heutiger als auch künftiger Mobilität und Fahrzeugtechnologien.

9 Bearbeitungstechnische Zusammenfassung des Forschungsprojektes und Ausblick

Zentrale Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zur Realisierung der Forschungsarbeiten an der TU Dresden (Projektkoordination) ist über die gesamte Projektlaufzeit eine durchlaufende Vollzeitstelle für wissenschaftliches Personal eingesetzt worden. Die zentralen Aufgaben im Projekt waren die Rolle der Projektkoordination im Forschungsprojekt, die Unterstützung in Bezug auf die Kommunikations- und Beteiligungsstrategie, die Recherche des aktuellen Wissenstandes, die Operationalisierung des Nachhaltigkeitsbegriffs, die Erarbeitung von Einsatzszenarien und das Überführen dieser Einsatzszenarien in konkrete Modellierungsaufgaben. Darüber hinaus waren weitere Tätigkeiten die Entwicklung und Anwendung eines geeigneten Bewertungsverfahrens der Einsatzszenarien, die Zuarbeit insbesondere bei der Kalibrierung des MATSim-Modells sowie abschließend die Ableitung konkreter Handlungsempfehlungen für die Stadt Leipzig und für andere urbane Räume.

Zur Realisierung der Forschungsarbeiten an der TU Berlin, ist mit Ausnahme von November bis Dezember 2023 wissenschaftliches Personal eingesetzt worden. Zentrale Aufgaben waren der Aufbau des Verkehrsmodells, die Implementierung und Simulation der Einsatzszenarien und die Zuarbeit und Kommunikation mit den Projektpartnern. Weiterhin ist ein Unterauftrag an die Firma Senozon Deutschland GmbH zu nennen, zur Beschaffung der auf Mobilfunkdaten beruhenden Verkehrsnachfrage.

Die TU Dresden sowie die TU Berlin waren darüber hinaus auch für die konzeptionelle Erarbeitung, die Moderation sowie die inhaltliche Durchführung der *NaMAV-Zukunftslabore* verantwortlich.

Die Stadt Leipzig hat im Rahmen des Projektes ebenfalls eine durchlaufende Vollzeitstelle zur Verfügung gehabt. Die zentralen Aufgaben der Stadt Leipzig vorrangig in der Entwicklung geeigneter Kommunikations- und Beteiligungsstrategien, d.h. zum Beispiel in der Organisation und Durchführung von Veranstaltungen (z. B. *NaMAV-Zukunftslabore*) sowie der Kommunikation mit internen Gremien (z. B. Stadtrat). Darüber hinaus war die Stadt Leipzig in der Phase der Ableitung von Handlungsempfehlungen fest eingebunden.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Zur Zeit der Projektbeantragung standen keine Landes- oder Drittmittel für das Forschungsprojekt *NaMAV* zur Verfügung. Für die Durchführung des Forschungsprojektes wurden zwingend die Fördermittel des Bundes benötigt. Darüber hinaus war das Projekt nicht Gegenstand einer anderen Fördermaßnahme. Eine Recherche der Fördermöglichkeiten der Europäischen Union und anderer nationaler Fördermittelgeber und -programme ergab, dass eine Finanzierung des Projektes *NaMAV* aus anderen Quellen zur Zeit der Projektbeantragung ebenfalls nicht möglich gewesen ist. Ohne die bean-

tragte Förderung hätte das Projekt nicht durchgeführt werden können. Bei Nichtdurchführung des Projekts bestand die Gefahr, dass das Thema der Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr dominant durch die Fahrzeugindustrie getrieben wird und die entwickelten Fahrzeugkonzepte nicht mit den Nutzeranforderungen und Nachhaltigkeitszielen übereinstimmen. Eine enge Verzahnung technologischer Entwicklungen mit der Erarbeitung stadt- und verkehrsplanerischer Konzepte ist notwendig, um die Chancen der neuen Technologien gezielt zu nutzen und mögliche Risiken zu minimieren.

Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Das im Rahmen des Projekts *NaMAV* entwickelte MATSim-Modell bietet eine geeignete Grundlage für die Verkehrsmodellierung der Stadt Leipzig, welche komplementär zu den von den Partnern vor Ort betriebenen aggregierten Verkehrsmodellen die Planung unterstützen kann (vgl. Projekt MONI¹³). Das Modell steht „open source“ zur Verfügung und kann damit kostenlos von der Stadt Leipzig sowie möglicherweise von anderen lokalen Akteuren (z. B. LVB, „Flexa“-Abteilung) auch nach der Projektlaufzeit genutzt und weiterentwickelt werden. Die drei im Projekt entwickelten Einsatzszenarien sowie deren Wirkungsabschätzungen sind im Diskurs über zukünftige Verkehrs- und Mobilitätsplanung sehr gut als Diskussionsgegenstand geeignet. Durch das Projekt wurde es möglich, verschiedene Akteure der Stadt Leipzig in regelmäßigen Intervallen zusammenzubringen und über Zukunftsthemen der Mobilitäts- und Verkehrsentwicklung der Stadt Leipzig zu diskutieren. Damit hat das Projekt zu einer Stärkung der Vernetzung lokaler Akteure beigetragen. Wie weiter unten in diesem Kapitel aufgeführt könnten die Ergebnisse von *NaMAV* bereits auf Konferenzen und in wissenschaftlichen Zeitschriften verwendet werden. Die im Projekt entwickelten weiteren Funktionalitäten im MATSim Modell (z. B. Parken) können in der Zukunft in weiteren Forschungsprojekten aufgegriffen und weiterentwickelt werden.

Fortschritte auf dem Gebiet des Forschungsgegenstandes während der Durchführung

Während der Projektlaufzeit von *NaMAV* haben auf dem Gebiet des Forschungsgegenstandes weitere Aktivitäten stattgefunden. Hierbei ist vor allem das von der Stadt Leipzig betriebene „Flexa“-Angebot zu benennen, welches kontinuierlich ausgebaut wird. Während der Projektlaufzeit wurde ein intensiver Austausch mit den Leipziger Verkehrsbetrieben angestrebt. Nicht zuletzt waren Vertreter:innen der Leipziger Verkehrsbetriebe im Projektbeirats tätig. Das Projekt Flexa ist darüber hinaus auch in das Forschungsprojekt „Pendlermobilität in Leipzig und Umland stärken – Mobilität und

¹³ Projekt-MONI: https://static.leipzig.de/fileadmin/mediendatenbank/leipzig-de/Stadt/02.6_Dez6_Stadtentwicklung_Bau/66_Verkehrs_und_Tiefbauamt/Verkehrskonzepte/Stadtraumkonzept/7-Projektbeirat_BMVI_Projekt_MONI_15-04-21.pdf

Verkehrswende aktiv voranbringen“ eingebettet. Dieses Projekt ist Teil des vom BMDV finanzierten Förderprogramms Modellprojekt zur Stärkung des ÖPNV (<https://www.l.de/verkehrsbetriebe/ueber-uns/modellprojekt-pendlerverkehr/>). In diesem Projekt wird die ÖV-Anbindung von Gewerbestandorten im Umland von Leipzig. Neben diesem Förderprojekt ist auch das Projekt “Absolut” (<https://absolut-projekt.de/>) besonders relevant für NaMAV. Im Projekt “Absolut” wird an automatisierten Bedarfslösungen für den ÖPNV geforscht. (<https://absolut-projekt.de/>)

Ein weiteres Projekt, welches für das Projekt NaMAV Relevanz besitzt, ist das Forschungsprojekt “Kelride” (<https://kelride.com/>), bei dem die TUB ebenfalls involviert ist. Die TUB simuliert diesem Projekt das Mobilitätsverhalten mit MATSim, sodass entsprechende Synergien zum Projekt NaMAV entstanden sind.

Hinsichtlich der strategischen Mobilitätsplanung ist abschließend noch das “Mobilitätskonzept erweiterte Innenstadt Leipzig” (<https://www.leipzig.de/umwelt-und-verkehr/verkehrsplanung/verkehrskonzepte/stadtraumkonzept/mobilitaetskonzept-erweiterte-innenstadt>) zu erwähnen, welches von der TUD, Professur für Mobilitätssystemplanung, bearbeitet wurde. Auch hier könnten die im Rahmen des Mobilitätskonzeptes erworbenen Kenntnisse zu Visionen, Zielen und Maßnahmen auf der Ebene der strategischen Verkehrsentwicklung der Stadt Leipzig gewinnbringend im Projekt NaMAV aufgegriffen werden.

Erfolge und (geplante) Veröffentlichungen

Erfolgte:

Rakow, C., & Nagel, K. (2024a): Road network free flow speed estimation using microscopic simulation and point-to-point travel times. Procedia Computer Science, Vol. 238, 2024, pp. 698–705.

Rakow, C., & Nagel, K. (2024b): Automated calibration of alternative specific constants in agent based transport models. Online abrufbar unter: <https://api-depositonce.tu-berlin.de/server/api/core/bitstreams/41c97993-bd47-449c-beff-ffebf2f97e22/content> (28.10.2024)

Rybczak, G.; Meinhardt, S.; Schlenther, T.; Rakow, C.; Ziemke, D., & Nagel, K. (2024a): Agent-based modeling of residential parking zones in Leipzig. Procedia Computer Science, 238, 749-756. Inklusive Supplementary Material: <https://doi.org/10.14279/depositonce-19841>

Geplante:

Krombach, J., Rybczak, G., Noroozi, V., Schlenther, T., Ribesmeier, M., Lu, C., Meinhardt, S., Wagner, B., Ziemke, D., Nagel, K., & Gerike, R. (2024): Heute Vision, morgen Realität? Erarbeitung und Bewertung von MATSim-Einsatzszenarien für ein nachhaltiges Verkehrssystem am Beispiel der Stadt Leipzig. In: BeNaMo-Sammelband (derzeit im Veröffentlichungssprozess)

Lu, C., & Nagel, K. (2024a): An improved procedure for simulation of demand-responsive transport services in agent-based transport simulation framework

Lu, C., & Nagel, K. (2024b): Quantifying the benefits of pre-booking in demand-responsive systems based on real-world scenarios. Präsentiert auf dem Transportation Research Board 2024 Meeting.

Rybczak, G., Lu, C., Ziemke, D., & Nagel, K. (2024b): Is a modal shift enough to reach the climate targets? A case Study using an agent-based transport simulation for the city of Leipzig. Wird präsentiert auf dem Transportation Research Board 2025 Meeting.

10 Literaturverzeichnis

ADAC (2024): Autonomes Fahren: So fahren wir in Zukunft. Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC). Online abrufbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/technik-vernetzung/aktuelle-technik/> (14.10.2024)

BASt (o. J. a): Nutzerkommunikation. Was heißt eigentlich autonomes Fahren? Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Online abrufbar unter:
<https://www.bast.de/DE/Fahrzeugtechnik/Fachthemen/f4-nutzerkommunikation.html?nn=1813014> (14.10.2024)

BASt (o. J. b): Automatische Dauerzählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Online abrufbar unter:
<https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Verkehrszaehlung.html> (28.10.2024)

BMDV (2021): Gesetz zum autonomen Fahren tritt in Kraft. Bundesministerium für Digitales und Verkehr. Online abrufbar unter: <https://bmdv.bund.de/Shared-Docs/DE/Artikel/DG/gesetz-zum-autonomen-fahren.html> (14.10.2024)

DB (o. J.): Erste autonome Buslinie Deutschlands (Faktenblatt). Hrsg.: Deutsche Bahn AG. Online abrufbar unter: <https://www.deutschebahn.com/resource/blob/259942/5ff8f9ba554b7fa90cd574836614918d/Faktenblatt-autonomer-Bus-data.pdf> (29.10.2024)

Ewert R., & Nagel, K. (2024): Agentenbasierte Modellierung des kleinräumigen Wirtschaftsverkehrs. Online abrufbar unter: https://verlag.fgsv-datenbanken.de/tagungs-baende?kat=HEUREKA&p=3&tagungsband=2530&_titel=Agentenbasierte+Modellierung+des+kleinr%C3%A4umigen+Wirtschaftsverkehrs (29.10.2024)

FGSV (2020): Chancen und Risiken des autonomen und vernetzten Fahrens aus der Sicht der Verkehrsplanung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Online abrufbar unter: https://www.fgsv.de/fileadmin/user_upload/006_14.v.pdf (14.10.2024)

Fraunhofer (2024): Autonomes Fahren. Fraunhofer-Institut für Kognitive Systeme IKS. Online abrufbar unter: <https://www.iks.fraunhofer.de/de/themen/autonomes-fahren.html> (14.10.2024)

Gerike, R., Wittwer, R., & Weber, J. (2021): Mobilitätskonzept erweiterte Innenstadt Leipzig. Ein Fachkonzept mit Vision, Zielen und Maßnahmen im Stadtraumkonzept erweiterte Innenstadt. Hrsg.: Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, Professur für Integrierte Verkehrsplanung und Straßenverkehrstechnik. Online abrufbar unter: <https://www.leipzig.de/umwelt-und-verkehr/verkehrsplanung/verkehrskonzepte/stadtraumkonzept/mobilitaetskonzept-erweiterte-innenstadt> (30.09.2024)

Horni, A., Nagel, K., & Axhausen, K.W. (Hrsg.) (2016): The Multi-Agent Transport Simulation MATSim. Ubiquity, London, doi: 10.5334/baw

KBA (o.J.): Automatisierungsstufen. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Online abrufbar unter:

https://www.kba.de/DE/Themen/Marktueberwachung/Produktpruefungen/AutomatisiertesAutonomesFahren/Automatisierungsstufen/Automatisierungsstufen_node.html
(14.10.2024)

Kong, Y., Ou, J., Chen, L., Yang, F., & Yu, B. (2023): The Environmental Impacts of Automated Vehicles on Parking: A Systematic Review. Sustainability, 15(20), 15033.

Krail, M. (2019): Verkehrliche und ökologische Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens. Journal für Mobilität und Verkehr. Ausgabe 2. Mai 2019: 33-40.

Krombach, J., Rybczak, G., Noroozi, V., Schlenther, T., Ribesmeier, M., Lu, C., Meinhardt, S., Wagner, B., Ziemke, D., Nagel, K., & Gerike, R. (2024): Heute Vision, morgen Realität? Erarbeitung und Bewertung von MATSim-Einsatzszenarien für ein nachhaltiges Verkehrssystem am Beispiel der Stadt Leipzig. In: BeNaMo-Sammelband (derzeit im Veröffentlichungssprozess)

Lopez, P.A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y.P., Hilbrich, R., Lücke, L., Rummel, J., Wagner, P. & Wiessner, E. (2018): Microscopic Traffic Simulation using SUMO, in: 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp. 2575–2582. doi:10.1109/ITSC.2018.8569938.

Lu, C., Martins-Turner, K., & Nagel, K. (2022): Creating an agent-based long-haul freight transport model for Germany. Procedia Computer Science, 201, 614–620, doi: 10.1016/j.procs.2022.03.080

LVB (2024): Flexa – flexible Mobilität für dich. Online abrufbar unter:
<https://www.l.de/verkehrsbetriebe/fahren/flexa/> (29.10.2024)

Maciejewski, M. (2016): Dynamic Transport Services. In: Horni, A, Nagel, K & Axhausen, K W. (Hrsg.) The Multi-Agent Transport Simulation MATSim, Pp. 145–152. London: Ubiquity Press. DOI: http://dx.doi.org/10.5334/baw.23. License: CC-BY 4.0

Makahleh, H. Y., Ferranti, E. J. S., & Dissanayake, D. (2024): Assessing the Role of Autonomous Vehicles in Urban Areas: A Systematic Review of Literature. Future Transportation, 4(2), 321-348.

Neumann, A., & Balmer, M. (2020): Mobility Pattern Recognition (MPR) und Anonymisierung von Mobilfunkdaten (White Paper). Senozon Deutschland GmbH und Senozon AG. Online abrufbar unter: https://senozon.com/wp-content/uploads/White-paper_MPR_Senozon_DE-3.pdf (V1.0) (30.10.2024)

Polizeidirektion Leipzig (2021): Verkehrsbericht 2021. Online abrufbar unter:
<https://www.leipzig.de/umwelt-und-verkehr/unterwegs-in-leipzig/verkehrssicherheit>
(30.09.2024)

Pozoukidou, G., & Chatziyiannaki, Z. (2021): 15-Minute City: Decomposing the New Urban Planning Eutopia, Sustainability, 13(2), 928, doi: 10.3390/su13020928

Prognos AG (2018): Einführung von Automatisierungsfunktionen in der Pkw-Flotte – Auswirkungen auf Bestand und Sicherheit. Studie im Auftrag des ADAC e.V.

Rahman, M. M., & Thill, J. C. (2023): Impacts of connected and autonomous vehicles on urban transportation and environment: A comprehensive review. Sustainable Cities and Society, 96, 104649.

Rakow, C., & Nagel, K. (2024a): Road network free flow speed estimation using microscopic simulation and point-to-point travel times. Procedia Computer Science, Vol. 238, 2024, pp. 698–705.

Rakow, C., & Nagel, K. (2024b): Automated calibration of alternative specific constants in agent based transport models. Online abrufbar unter: <https://api-depositonce.tu-berlin.de/server/api/core/bitstreams/41c97993-bd47-449c-beff-ffebf2f97e22/content> (29.10.2024)

Rieser, M., Horni, A. and Nagel, K. (2016): Let's Get Started. In: Horni, A, Nagel, K. & Axhausen, K. W. (Hrsg.) The Multi-Agent Transport Simulation MATSim, Pp. 9–22. London: Ubiquity Press. DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/baw.2>. License: CC-BY 4.0

Rybczak, G.; Meinhardt, S.; Schlenther, T.; Rakow, C.; Ziemke, D., & Nagel, K. (2024a): Agent-based modeling of residential parking zones in Leipzig. Procedia Computer Science, 238, 749–756. Inklusive Supplementary Material: <https://doi.org/10.14279/depositonce-19841>

Rybczak, G., Lu, C., Ziemke, D., & Nagel, K. (2024b): Is a modal shift enough to reach the climate targets? A case Study using an agent-based transport simulation for the city of Leipzig. Wird präsentiert auf dem Transportation Research Board 2025 Meeting.

SAE (2021): SAE Levels of Driving Automation™ Refined for Clarity and International Audience. SAE International. Online abrufbar unter: <https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update> (14.10.2024)

Stadt Leipzig (2008): Fortschreibung der Konzeption autoarme Innenstadt. Stadt Leipzig, Verkehrs- und Tiefbauamt. Online abrufbar unter: <https://www.leipzig.de/umwelt-und-verkehr/verkehrsplanung/verkehrskonzepte/autoarme-innenstadt> (30.09.2024)

Stadt Leipzig (2015): Stadtentwicklungsplan Verkehr und öffentlicher Raum. Erste Fortschreibung. Hrsg.: Stadt Leipzig, Dezernat Stadtentwicklung und Bau, Verkehrs- und Tiefbauamt. Online abrufbar unter: <https://www.leipzig.de/bauen-und-wohnen/stadtentwicklung/stadtentwicklungsplaene-step/step-verkehr-und-oeffentlicher-raum> (30.09.2024)

Stadt Leipzig (2017): Mobilitätsstrategie 2030 für Leipzig. Anlage 1: „Ein lebenswertes Leipzig in Bewegung“ Hrsg.: Stadt Leipzig, Dezernat Stadtentwicklung und Bau, Verkehrs- und Tiefbauamt. Online abrufbar unter: <https://www.leipzig.de/buergerservice-und-verwaltung/buergerbeteiligung-und-einflussnahme/aktuelle-beteiligungen/detail/projekt/mobilitaetsstrategie-2030-1> (30.09.2024)

Stadt Leipzig (2019): Luftreinhalteplan für die Stadt Leipzig. Fortschreibung 2018. Hrsg.: Stadt Leipzig, der Oberbürgermeister. Amt für Umweltschutz. Online abrufbar unter: https://static.leipzig.de/fileadmin/mediendatenbank/leipzig-de/Stadt/02.3 Dez3_Umwelt_Ordnung_Sport/36_Amt_fuer_Umweltschutz/Luft_und_Laerm/Luftreinhaltung/Luftreinhalteplan/LRP-2018_online.pdf (30.09.2024)

Stadt Leipzig (2020): Mobilität in Leipzig 2018. Faktenblatt. Hrsg.: Stadt Leipzig, der Oberbürgermeister. Verkehrs- und Tiefbauamt. Online abrufbar unter: <https://www.leipzig.de/umwelt-und-verkehr/verkehrsplanung/verkehrsbefragungen> (30.09.2024)

Stadt Leipzig (2023): Bevölkerungsvorausschätzung 2023. Methoden und stadtweite Ergebnisse. Teil 1. Hrsg.: Stadt Leipzig. Amt für Statistik und Wahlen. Online abrufbar unter: <https://www.leipzig.de/newsarchiv/news/bevoelkerungsprognose-2023-leipzig-waechst-entgegen-des-trends> (25.09.2024)

Stadt Monheim (o.J.): Autonom fahrende Busse. Stadt Monheim am Rhein. Online abrufbar unter: <https://www.monheim-entdecken.de/lse/lehenswuerdigkeiten/autonome-busse/> (28.10.2024)

Trommer, S., Kröger, L., & Kuhnlimhof, T. (2017): Potential Fleet Size of Private Autonomous Vehicles in Germany and the US. In: Road Vehicle Automation 4, Meyer, G., Beiker, S. (Hrsg.), Springer Nature, Cham, 247-256.

TU Dresden (2018): Mobilität in Städten – SrV. Online abrufbar unter: <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/srv/srv-2018> (29.10.2024)

Olayode, I. O., Du, B., Severino, A., Campisi, T., & Alex, F. J. (2023): Systematic literature review on the applications, impacts, and public perceptions of autonomous vehicles in road transportation system. Journal of traffic and transportation engineering (English edition).

Orieno, O. H., Ndubuisi, N. L., Ilojianya, V. I., Biu, P. W., & Odonkor, B. (2024): The future of autonomous vehicles in the US urban landscape: a review: analyzing implications for traffic, urban planning, and the environment. Engineering Science & Technology Journal, 5(1), 43-64.

VDV (o.J.): Autonome Shuttle-Bus-Projekte in Deutschland. Hrsg.: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. Online abrufbar unter: <https://www.vdv.de/liste-autonome-shuttle-bus-projekte.aspx> (29.10.2024)

VTA Leipzig (2023): Verkehrsbefragungen. Online abrufbar unter: <https://www.leipzig.de/umwelt-und-verkehr/verkehrsplanung/verkehrsbefragungen>

World Health Organization [WHO] (2020): WHO guidelines on physical activity and sedentary behaviour. Online abrufbar unter: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240015128> (29.10.2024)

ZF (2022): Automatisiertes Fahren: Stufen zum selbstfahrenden Fahrzeug. ZF Friedrichshafen AG. Online abrufbar unter: https://www.zf.com/mobile/de/technologies/automated_driving/stories/6_levels_of_automated_driving.html (14.10.2024)