

# Schlussbericht des Verbundes

- öffentlich einsehbar -

## ViVre

Vernetzung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter  
Fahrfunktionen für nachhaltige Mobilitätslösungen



<b>Zuwendungsempfänger:</b> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (Koordinator) Bliq GmbH AVL Software and Functions GmbH OECON Products & Services GmbH OFFIS e.V. Schlothauer & Wauer GmbH Technische Universität Braunschweig	<b>Förderkennzeichen:</b> 01MM19014A 01MM19014B 01MM19014C 01MM19014D 01MM19014E 01MM19014F 01MM19014G
<b>Kontakt Konsortialführer:</b> Robert Kaul Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)	Tel.: +49 531 295 3469 E-Mail: <a href="mailto:robert.kaul@dlr.de">robert.kaul@dlr.de</a>
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> von: 01.01.2020 bis: 30.06.2022	
<b>Datum Bericht:</b> 31.08.2022	

## Inhalt

1.	Kurzdarstellung.....	3
1.1.	Aufgabenstellung.....	4
1.2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	5
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	6
1.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	7
	Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.....	7
	Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste .....	7
1.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	10
2.	Eingehende Darstellung .....	12
	Digitalisierungs- und Virtualisierungsmöglichkeiten.....	12
	Use Cases, Szenarien und Anforderungsdefinitionen .....	22
	Kooperations-, Informations- und Kommunikationskonzepte.....	26
	Architekturkonzepte für (teil-)virtualisierte Verkehrsinfrastruktur .....	28
	Absicherung und Echtzeitbehandlung.....	35
	Funktions- und HMI-Entwicklung .....	42
	Simulation, Absicherung des Echtzeitverhaltens und Demonstrator .....	59
	Bewertung, Nutzerakzeptanz und verkehrsrechtliche Begleitforschung.....	67
2.1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....	104
2.2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	105
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	106
2.4.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	109
2.5.	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	112
2.6.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses .....	112

## 1. Kurzdarstellung

Mobilität ist eine zentrale Grundlage für die individuelle Freiheit, ein Indikator für den gesellschaftlichen Wohlstand und wichtig für das wirtschaftliche Wachstum in Deutschland und Europa. Der wachsende Mobilitätsbedarf von Personen und Gütern stellt die innerstädtische Verkehrsinfrastruktur vor große Herausforderungen und vermindert die Lebensqualität der Bevölkerung durch erhöhte Emissionen und Verzögerungen durch Staus. Gleichzeitig steigert das erhöhte Aufkommen von Berufspendlern die Nachfrage nach einem bedarfsgerechten öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) sowie einer flexibleren Anbindung des ländlichen Raums. Langfristig ist daher eine Verlagerung des individuellen Fahrzeugverkehrs in Richtung intelligenter, moderner, emissionsarmer und nachhaltiger Mobilitätslösungen notwendig. Zudem gilt es infolge der steigenden Anforderungen an den innerstädtischen Warenverkehr, auch die zukünftigen Logistikdienstleistungen bedarfsgerecht zu gestalten und in Mobilitätslösungen einzubinden.

Die Digitalisierung des Straßenverkehrs sowie das automatisierte und vernetzte Fahren ermöglichen neue nachhaltige Mobilitätslösungen für einen effizienten und sicheren Personen- und Güterverkehr wie beispielsweise der Einsatz fahrerloser Fahrzeuge in flexiblen, bedarfsgerechten Bedienkonzepten. Damit solche neuen Lösungen erfolgreich sind, müssen sie sowohl technisch sicher im Verkehrsraum funktionieren, sich effizient in das Verkehrsgeschehen einfügen und die Bedarfe der Nutzer erfüllen. Wichtig ist dabei der integrierte Entwurf von neuen Fahrzeugfunktionen, weiterentwickelter Verkehrsinfrastruktur und einer optimierten Verkehrssteuerung.

Entscheidende Interaktionen zwischen Nutzern, Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern geschehen dabei insbesondere an Verkehrsknoten. An Verkehrsknoten treffen Verkehrsströme aufeinander, unterschiedliche Verkehrsteilnehmer interagieren und die Verkehrsknoten entscheiden über den Verkehrsfluss im Netz und entlang von Reise- und Transportketten. Gleichzeitig sind Verkehrsknoten in der Regel durch umfangreiche Infrastruktur geprägt, die wenig Flexibilität erlaubt und hohe Kosten verursacht. Hier kann die Digitalisierung und Virtualisierung von Verkehrsinfrastruktur-Elementen einen Beitrag leisten, da so einerseits Flexibilität gewonnen und andererseits kostenintensive physische Aufbauten reduziert werden können.

Neben bestehenden Verkehrsknoten wie beispielsweise Straßenkreuzungen, Kreisverkehren oder Fußgängerüberwegen sind für zukünftige Mobilitätslösungen insbesondere flexible, bedarfsgerechte Haltestellen von zunehmender Bedeutung. Hier treffen verschiedene Verkehrsströme wie Fußgänger, Radfahrer und Fahrzeuge aufeinander, was gerade bei neuen Funktionen zu komplexen Interaktionen führen kann. Außerdem können Haltestellen, wie viele andere Verkehrsknoten, einen starken Einfluss auf den Verkehrsfluss haben, so dass sie in Koordination mit anderen Knoten intelligent gesteuert werden sollten. Je flexibler das Bedienkonzept sein soll, desto höher sind die Anforderungen an neue, flexible Haltestellen, die ohne hohe Infrastrukturkosten eingerichtet werden können.

Ziel des Projektes ViVre war es die Vernetzung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen für zentrale Verkehrsknoten zu erforschen und damit Bausteine für innovative und nachhaltige Mobilitätslösungen zu erarbeiten. Insbesondere wurden Konzepte für neue virtuelle Haltestellen erarbeitet, im Straßenverkehr umgesetzt und evaluiert. Dabei werden integriert neue Funktionen automatisierter vernetzter Fahrzeuge und (teilweise) virtualisierter Infrastruktur entwickelt. Für eine optimierte Verkehrssteuerung wurde zudem die Wechselwirkung zwischen virtuellen Haltestellen und anderen betrachteten Verkehrsknoten analysiert und es wurden

Möglichkeiten einer koordinierten Verkehrssteuerung im Rahmen der ÖPNV-Priorisierung an den Knoten entworfen.

Weitere Ergebnisse des Projektes ViVre waren die Umsetzung der virtuellen Haltestellen im Zusammenspiel mit anderen Verkehrsknoten und den Versuchsfahrzeugen der Projektpartner im Realverkehr des digitalen Testfelds AIM (Anwendungsplattform Intelligente Mobilität), welches auch durch das Projekt erweitert wurde. Ferner standen die Entlastung des öffentlichen Raums, die Verknüpfung zwischen den Verkehrsträgern im Individual- und öffentlichen Verkehr sowie Untersuchungen zur Einführungsstrategie für den Regelbetrieb im Fokus. Die Ergebnisse von ViVre wurden einem breiten Spektrum von Wissenschaftlern in Vorträgen und wissenschaftlichen Abhandlungen zur Verfügung gestellt.

Weiterhin wurde durch die industriellen Partner im Konsortium und durch assoziierte Partner sichergestellt, dass alle Forschungsarbeiten praxisnah und mit Bezug zu wirtschaftlichen Anforderungen entwickelt wurden und so auch im Projekt und danach wirtschaftlich verwertbar bleiben, indem sie in die Produktentwicklung der industriellen Partner einfließen und damit frühzeitig bestehende und neue Absatzmärkte adressieren.

## 1.1. Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel des Verbundprojektes ViVre war die Vernetzung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen für zentrale Verkehrsknoten zu erforschen und damit Bausteine für innovative und nachhaltige Mobilitätslösungen zu erarbeiten. Insbesondere wurden Konzepte für neue virtuelle Haltestellen erarbeitet, im Straßenverkehr umgesetzt und evaluiert. Dabei wurden integriert neue Funktionen automatisierter vernetzter Fahrzeuge und (teil-)virtualisierter Infrastruktur entwickelt. Für eine optimierte Verkehrssteuerung wurde zudem die Wechselwirkung zwischen virtuellen Haltestellen und anderen betrachteten Verkehrsknoten analysiert und es wurden Möglichkeiten einer koordinierten Verkehrssteuerung der Knoten entworfen. Ausgehend von dieser Zielsetzung und der unter Kapitel 1 beschriebenen Ausgangslage, wurden folgende Aufgabenstellungen und Forschungsfragen untersucht:

- *Was sind die Nutzeranforderungen für virtuelle Haltestellen?*

Im Rahmen von Nutzer- und Akzeptanzstudien wurden außenstehende Endnutzer eingebunden, um sowohl Nutzeranforderungen für virtuelle Haltestellen abzuleiten als auch die entwickelte Mobilitätsdienstleistung zu bewerten.

- *Was sind die technischen Anforderungen an virtuelle Haltestellen, wie beispielsweise auch Ort und Beschaffenheit des Umfeldes?*

Ein weiterer wesentlicher Forschungsschwerpunkt beschäftigte sich mit der Verortung virtueller Haltestellen zur Berücksichtigung der Mobilitätsbedarfe der Endnutzer. Dazu wurden unter Beteiligung der Stadt Braunschweig technische Anforderungen an geeignete virtuelle Haltestellen erarbeitet, die unter anderem Verkehrssicherheit und -effizienz gewährleisten. Beispiele für untersuchte Orte sind bestehende Haltestellen, geeignete Parkbuchten oder Bereiche in der Nähe von Kreuzungen. Weiterhin wurden technische Anforderungen an die Fahrzeuge und deren Vernetzung mit den virtuellen Haltestellen erforscht.

- *Wie können virtuelle Haltestellen gemanagt werden?*

Damit virtuelle Haltestellen sicher, effizient und bedarfsgerecht geöffnet und wieder geschlossen werden können, wurde ein Management-System für virtuelle Haltestellen entwickelt. Hierzu mussten neben dem Aufbau der IT-Systeme in Echtzeit beispielsweise Kriterien zu Bedarf, lokaler Belegung von Parkplätzen und Verkehrslage erfasst und ausgewertet werden.

- *Welche Verkehrskonflikte ergeben sich an virtuellen Haltestellen? Wie können virtuelle Haltestellen in eine effiziente Verkehrssteuerung integriert werden?*

Es wurden neue Verkehrssteuerungskonzepte notwendig, die virtuelle Haltestellen berücksichtigen, die sich anders als herkömmliche Haltestellen an wechselnden Orten befinden. Dabei wurden insbesondere für die Steuerung der Lichtsignalanlagen an benachbarten Verkehrsknoten neue Ansätze untersucht, um virtuelle Haltestellen, die dort ankommenden und abfahrenden Fahrzeuge sowie die dadurch im Verkehr verursachten Störungen zu berücksichtigen (z. B. ÖPNV-Priorisierung).

- *Welche Designkonzepte sind für virtuelle Haltestellen denk- und realisierbar? Welche Interaktionskonzepte sind geeignet und wie müssen sich Fahrzeuge dort verhalten?*

Gemeinsam mit Endnutzern wurden iterativ Gestaltungsoptionen der virtualisierten Infrastruktur, deren Darstellung sowie der Interaktion mit automatisierten, vernetzten Fahrzeugen untersucht. Mithilfe von Augmented Reality wurde es dabei für Endnutzer möglich eine fast realitätsnahe Umgebung zu schaffen ohne dabei Einschränkungen der realen Umgebung in Kauf nehmen zu müssen. Dazu mussten die vernetzten und automatisierten Fahrfunktionen der Fahrzeuge beispielsweise für ein geeignetes Anfahren, Halten, Losfahren und Einfädeln in den fließenden Verkehr entwickelt werden, so dass sie zu den konzipierten Interaktionskonzepten passten und keine Missverständnisse entstanden.

- *Wie ist die gesellschaftliche Akzeptanz für virtuelle Haltestellen?*

Die Akzeptanz der erarbeiteten Konzepte und Funktionen virtueller Haltestellen wurde evaluiert. Dazu wurde für Nutzerstudien auf Realdaten im Testfeld AIM zurückgegriffen. Interessant war hier eine Analyse der Wirkung des Zusammenspiels von Automatisierung, Vernetzung und Virtualisierung auf Endnutzerebene.

- *Welche rechtlichen Aspekte sind bei virtuellen Haltestellen zu berücksichtigen?*

Neben technischer Machbarkeit und gesellschaftlicher Akzeptanz sind für den Erfolg von virtuellen Haltestellen auch rechtliche Aspekte relevant. Für die rechtliche Machbarkeit sind u. a. das Personenbeförderungsgesetz und die Straßenverkehrsordnung relevant und wurden auf Rahmenbedingungen und notwendige Änderungen untersucht. Hierbei wurden sowohl die materiell-rechtlichen Anforderungen als auch die formal-rechtlichen Voraussetzungen für die Umsetzung der Einzelmaßnahmen, etwa über Sondergenehmigungen, untersucht.

## **1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Der Automationsgrad von Serienfahrzeugen wächst kontinuierlich seit mehr als 20 Jahren. Einige dieser Entwicklungen sind: „Tempomat“ (Daimler AG, patentiert seit 1975), Adaptive Cruise Control (ACC), Notbremsassistenten und Stauassistenten. In der Kombination mit sogenannten aktiven

Spurhalteassistenten bzw. „Lane Keeping Assist Systems“ kann erstmals von automatisiertem Fahren gesprochen werden. Zur besseren Klassifizierung von Systemen definierte der amerikanische Dachverband der Automobilindustrie, die Society of Automotive Engineers ([SAE](#)), fünf Stufen der Automation, beginnend bei 1 (Driver Assistance) bis hin zu 5 (Full Automation). In den meisten Staaten sind vollautomatisierte Systeme der Stufe 5 derzeit nicht zulassungsfähig oder nur zur Erprobung zugelassen. Die derzeit auf dem Markt erhältlichen Systeme der Fahrzeughersteller beschränken daher den Einsatz auf ein assistiertes oder teilautomatisiertes Fahren. Dies geschieht einerseits rechtlich durch Anweisungen im Fahrzeug und in der Bedienungsanleitung und andererseits technisch, etwa durch eine sog. „Hands-on“-Erkennung. Die Echtzeit-Kommunikation und -Kooperation von automatisierten und vernetzten Fahrzeugen unter Einbezug zusätzlicher Informationen und Empfehlungen digitalisierter Verkehrsinfrastruktur, wie sie im Verbundprojekt ViVre für das innerstädtische Verkehrsnetz untersucht wurden, werden von der Industrie als großes Potential zur Verbesserung automatischer Fahrfunktionen angesehen. Sie wurde vor ViVre bisher aber noch nicht in der wie in ViVre geplanten Form im öffentlichen Raum untersucht.

### 1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundvorhaben ViVre wurde ursprünglich auf eine Laufzeit von zwei Jahren geplant (01.01.2020 – 31.12.2021). Aufgrund der im Jahr 2020 eintretenden COVID-19-Pandemie und den damit verbundenen Lockdowns, konnten keine Face-2-Face-Workshops samt gemeinsamer Entwicklungsarbeiten an automatisierten sowie vernetzten Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur durchgeführt werden. Daraus resultierte, dass sämtliche Workshops online durchgeführt wurden und die ersten Projektarbeiten konzeptioneller Natur waren. So wurden im ersten Projektjahr die Konzepte zu den Digitalisierungs- und Virtualisierungsmöglichkeiten erarbeitet sowie die Use Cases und Szenarien spezifiziert und ausgehend davon Anforderungen abgeleitet. Ferner wurden die Kooperations-, Informations- und Kommunikationskonzepte beschrieben sowie die Architekturkonzepte für (teil-)virtualisierte Verkehrsinfrastrukturen erstellt und die Absicherung und Echtzeitbehandlung adressiert. Zusätzlich wurden erste Simulationsarbeiten durchgeführt. Im zweiten Projektjahr konnten unter Einhaltung strikter Hygienerichtlinien und -konzepte die gemeinsamen Entwicklungsarbeiten an automatisierten sowie vernetzten Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur durchgeführt werden. So konnte sowohl die Funktions- und HMI-Entwicklung durchgeführt als auch die Bewertung und Nutzerakzeptanz untersucht werden. Die verkehrsrechtliche Begleitforschung lief als Querschnittsaktivität parallel zu den Konzeptionierungs- und Entwicklungsarbeiten. Aufgrund der massiven Einschränkungen in den Entwicklungsarbeiten durch die Lockdowns, musste das Verbundvorhaben um sechs Monate zuwendungsneutral bis zum 30.06.2022 verlängert werden. Die Projektinhalte wurden wissenschaftlich-technisch in folgende Bereiche untergliedert und erarbeitet:

- [Digitalisierungs- und Virtualisierungsmöglichkeiten](#)
- [Use Cases, Szenarien und Anforderungsdefinitionen](#)
- [Kooperations-, Informations- und Kommunikationskonzepte](#)
- [Architekturkonzepte für \(teil-\)virtualisierte Verkehrsinfrastruktur](#)
- [Absicherung und Echtzeitbehandlung](#)
- [Funktions- und HMI-Entwicklung](#)
- [Simulation, Absicherung des Echtzeitverhaltens und Demonstrator](#)

- [Bewertung, Nutzerakzeptanz und verkehrsrechtliche Begleitforschung](#)

Die zentralen Ergebnisse dieser wissenschaftlich-technischen Bereiche gehen aus [Kapitel 2](#) hervor.

#### **1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Das Projekt ViVre baut direkt auf den Ergebnissen des Projektes „Digitaler Knoten 4.0“ auf. Die dort entwickelte Blaupause für die Digitalisierung innerstädtischer Verkehrsknotenpunkte diente als Ausgangspunkt für die Entwicklung der neuen Konzepte und Funktionen in Fahrzeugen und Infrastruktur und deren Zusammenspiel an neuen digitalen Knotenpunkten. Wesentliches Kernergebnis des Projekts Digitaler Knoten 4.0 war die Referenzarchitektur als Blaupause für die Realisierung digitaler Knotenpunkte der Zukunft in urbanen und ländlichen Räumen. Diese Referenzarchitektur kann von jedem Infrastrukturbetreiber genutzt werden, um eine digitale Kreuzung (Knotenpunkt) aufzubauen. Dabei spielt es keine Rolle wie komplex der Knotenpunkt ist, da die Referenzarchitektur für die Instanziierung skalierbar entwickelt wurde.

Zusätzlich wurde im Projekt Digitaler Knoten 4.0 ein Kooperations- und Kommunikationskonzept für die Kooperation von automatisierten Fahrzeugen mit VRU und nicht-automatisierten Fahrzeugen im Straßenverkehr entwickelt. Dieses Kooperationskonzept schließt die Verwendung von Nachrichtentypen wie CRM (Cooperation Recommendation Message), CDM (Cooperation Decision Message), CIM (Cooperative Intention Message) ein. Ferner wurde der Nachrichtentyp CPM (Collective Perception Message) entwickelt und als Standard bei der ETSI eingereicht. Zusätzlich wurde im Rahmen des Kooperations- und Kommunikationskonzepts ein externes HMI (eHMI) entwickelt. Mit diesem eHMI war es möglich die Fahrabsichten des automatisierten und vernetzten Fahrzeugs an Vulnerable Road User (VRU) zu kommunizieren.

Die im Rahmen von Digitaler Knoten 4.0 durchgeführte Bewertung des Gesamtsystems zeigt in den für diesen Zweck analysierten Use-Cases, dass durch automatisiertes Fahren die Verkehrssicherheit nicht beeinträchtigt wird und sogar steigen kann. Wurden die automatisierten Fahrzeuge im Rahmen des Kooperations- und Kommunikationskonzepts vernetzt, so konnte gezeigt werden, dass bei mindestens gleichbleibender Verkehrssicherheit die Verkehrseffizienz gegenüber automatisiertem und manuellem Fahren zunahm.

Abschließend wurden umfassende praktische Erprobungen ausgewählter Use Cases durch die Projektpartner im realen Straßenverkehr auf dem digitalen Testfeld AIM durchgeführt und demonstriert. Somit stellte die Integration der Projektergebnisse von Digitaler Knoten 4.0 in das Verbundvorhaben eine wesentliche Vorarbeit für ViVre dar und wurde entsprechend weiter genutzt und entwickelt.

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

Vergleiche [Kapitel 2](#) für eine ausführliche Beschreibung.

#### **Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste**

Armellini, M. G., Banse Bueno, O. A., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y. P., & Rummel, J. (2021, September). Brunswick simulation scenario for virtual-stops based DRT services with SUMO. In Proceedings of the 10th International Congress on Transportation Research.

- Armellini, Maria Giuliana. "Simulation of Demand Responsive Transport using a dynamic scheduling tool with SUMO." SUMO Conference Proceedings. Vol. 2. 2021.
- Backhaus, K., Erichson, B. & Weiber, R. (2015). Fortgeschrittene Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung (3. Auflage). Berlin Heidelberg: Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46087-0>
- BBSR - Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (2015). Neue Mobilitätsformen, Mobilitätsstationen und Stadtgestalt. BBR, Bonn.
- Bochkovskiy, A.; Wang, C.; Liao, H. M.: YOLOv4 (2020): Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. In: CoRR abs/2004.10934. <https://arxiv.org/abs/2004.10934>
- Burger, C., Orzechowski, P., Tas, Ö. S. and Stiller, C., (2017). "Rating cooperative driving: A scheme for behavior assessment", Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Transp. Syst., pp. 1-6.
- Clark, H. H. (1996). Using Language. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cohen, K Human, Behavior and new mobility trends in the United States, Europe, and China 2019
- Eckard Böde, W. Damm, et al. (2019). MULTIC-Tooling. Verband der Automobilindustrie (VDA), Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT). Retrieved from <https://www.vda.de/de/services/Publications/fat-schriftenreihe-316.html>
- Fornauf, L. (2015). Entwicklung einer Methodik zur Bewertung von Strategien für das dynamische Straßenverkehrsmanagement, Darmstadt: Technische Universität, Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik.
- Gómez-Bravo, F., Cuesta, F. & Ollero, A. (2001). Parallel and diagonal parking in nonholonomic autonomous vehicles. Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 14, no. 4, pp. 419-434.
- Gómez-Bravo, F., Cuesta, F., Ollero, A. & Viguria, A. (2008). Continuous curvature path generation based on  $\beta$ -spline curves for parking manoeuvres. Robotics and Autonomous Systems, Vol. 56, no. 4, pp. 360-372.
- Harmann, D., Yilmaz-Niewerth, S., & Jacob, C. (2022). Methodological Distribution of Virtual Stops for Ridepooling. Transportation Research Procedia, 62, 442-449.
- Hoc, J. M. (2000). From human-machine interaction to human-machine cooperation. Ergonomics, 43, pp. 833–843.
- Hoc, J. M. (2001). Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. International Journal of Human-Computer Studies 54(4), pp. 509–540. doi: 10.1006/ijhc.2000.0454.
- Holmer, O. (2016). Motion Planning for a Reversing Full-Scale Truck and Trailer System. Linköping University, Linköping.
- Hölzel, A. (2008). Unterscheidung von formeller und informeller Kommunikation im Straßenverkehr. Diplomarbeit, Universität Wien.
- Homburg, C. & Giering, A. (1996). Konzeptualisierung und Operationalisierung komplexer Konstrukte. Ein Leitfaden für die Marketingforschung. Marketing ZFP, 18 (1), 5-24. <https://doi.org/10.15358/0344-1369-1996-1-5>

- Hub, F., Heß, S., Wilbrink, M., Oehl, M. (2022) Is this my ride? AV braking behavior from the perspective of waiting ride hailing customers. HCI International 2022 - Late Breaking Posters. HCII 2022. Communications in Computer and Information Science
- Hub, F., Meyer-Arlt, T., Avsar, H., & Oehl, M. (2022). Using an AR-interface for efficient navigation to DRT pick-up locations: a naturalistic field study. In S. Malejka, M. Barth, H. Haider, & C. Stahl (Eds.), Abstracts of the 64th TeaP – Tagung experimentell arbeitender Psycholog:innen / Conference of Experimental Psychologists – TeaP 2022 (pp. 370). Abstract retrieved from [https://teap2022.uni-koeln.de/sites/teap2022/user\\_upload/TeaP2022\\_AbstractBooklet.pdf](https://teap2022.uni-koeln.de/sites/teap2022/user_upload/TeaP2022_AbstractBooklet.pdf)
- Hub, F., Wilbrink, M., Kettwich, C., Oehl, M. (2020). Designing Ride Access Points for Shared Automated Vehicles - An Early Stage Prototype Evaluation. In: Stephanidis, C., Antona, M., Ntoa, S. (eds) HCI International 2020 – Late Breaking Posters. HCII 2020. Communications in Computer and Information Science, vol 1294. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-60703-6\\_72](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60703-6_72)
- Huynh, J. (2008). Separating Axis Theorem for Oriented Bounding Boxes.
- Jacoby, C. & Wappelhorst, S. (2016). Potenziale neuer Mobilitätsformen und -technologien für eine nachhaltige Raumentwicklung. Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL), Hannover.
- Kascha, M. (2022). Real implementation and validation of a model predictive lateral control for multiple applications of automated driving. In: WKM-Symposium 2022, Österreich, Graz.
- Kettwich, C.; Dodiya, J.; Wilbrink, M.; Schieben, A.M. Light-based communication of automated vehicles with other traffic participants—A usability study in a Virtual Reality environment. In Proceedings of the 13th International Symposium on Automotive Lightning; Khanh, T.Q., Ed.; Utzverlag GmbH: Munich, Germany, 2019; ISBN 978-3-8316-4817-7.
- Kuwata, Y., Teo, J., Fiore, G., Karaman, S., Frazzoli, E. & How, J. P. (2009). Real-time Motion Planning with Applications to Autonomous Urban Driving. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 17, no. 5, pp. 1105-1118.
- Lackes, R., Siepermann, M., Schewe, G., Szczutkowski, A., (2018). Definition: Information, abgerufen am 3.2.2021, von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/information-40528/version-263909>
- Lau, M., Le, D.H., Oehl, M. (2021). Design of External Human-Machine Interfaces for Different Automated Vehicle Types for the Interaction with Pedestrians on a Shared Space. In: Black, N.L., Neumann, W.P., Noy, I. (eds) Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021). IEA 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 221. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-74608-7\\_87](https://doi.org/10.1007/978-3-030-74608-7_87)
- Lopez, P. A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y. P., Hilbrich, R., ... & Wießner, E. (2018, November). Microscopic traffic simulation using sumo. In 2018 21st international conference on intelligent transportation systems (ITSC) (pp. 2575-2582). IEEE.
- Markkula, G., Madigan, R., Nathanael, D., Portouli, E., Lee, Y.M., Dietrich, A., Billington, J., Schieben, A., Merat, N. (2020). Defining interactions: a conceptual framework for understanding interactive behaviour in human and automated road traffic. Theoretical Issues in Ergonomics Science 57(3), pp. 1–24. doi: 10.1080/1463922X.2020.1736686.

- Muthén, L. K. & Muthén, B. O. (1998-2017). Mplus User's Guide (8. Auflage). Los Angeles, CA: Muthén & Muthén. Zugriff am 02.06.2022. Verfügbar unter <https://www.statmodel.com/ug excerpts.shtml>
- Risser, R., Zuzan, W.D., Tamme, W., Steinbauer, J., Kaba, A, (1991). Handbuch zur Erhebung von Verkehrskonflikten mit Anleitung zur Beobachterschulung. Kuratorium für Verkehrssicherheit, Band 28, Wien: Literas Universitätsverlag.
- Shaheen, S. & Chan, N. (2016). Mobility and the Sharing Economy: Potential to Facilitate the First- and Last-Mile Public Transit Connections. BUILT ENVIRONMENT, 42 (4), 573–588. <https://doi.org/10.2148/BENV.42.4.573>
- Sonka, A., Thal, S., Henze, R. (2021) Motion Prediction of Bicyclists in Urban Environments based on LiDAR Data, FAST-zero '21, Publication code: 20219030, Society of Automotive Engineers of Japan
- Touko Tcheumadjeu, L.C., Stuerz-Mutalibow, K., Hoeing, J., Harmann, D., Glaab, J., Kaul, R. (2022). New Concepts to Improve Mobility by Digitization and Virtualization: An Analysis and Evaluation of the Technical Feasibility. In: Martins, A.L., Ferreira, J.C., Kocian, A. (eds) Intelligent Transport Systems. INTSYS 2021. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, vol 426. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-97603-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97603-3_3)
- Ulbrich, S., Menzel, T., Reschka, A., Schuldt, F. & Maurer, M. (2015). Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren. In 10. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2015, Seiten 105–117, Walting im Altmühltal.
- Wilbrink, M.; Lau, M.; Illgner, J.; Schieben, A.; Oehl, M. Impact of External Human–Machine Interface Communication Strategies of Automated Vehicles on Pedestrians' Crossing Decisions and Behaviors in an Urban Environment. Sustainability 2021, 13, 8396. <https://doi.org/10.3390/su13158396>
- Wojke, N.; Bewley, A.; Paulus, D. (2017): Simple Online and Realtime Tracking with a Deep Association Metric. In: CoRR abs/1703.07402. <http://arxiv.org/abs/1703.07402>
- Ziegler, J. & Stiller, C. (2010). Fast Collision Checking for Intelligent Vehicle Motion Planning. IEEE Intelligent Vehicles Symp. IV, pp. 518-522.
- Zimmermann, M., Bengler, K. (2013). A multimodal interaction concept for cooperative driving. In: 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Gold Coast City, Australia, pp. 1285–1290. doi: 10.1109/IVS.2013.6629643

## 1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der gesamten Laufzeit des Verbundvorhabens ViVre wurde mit folgenden assoziierten Partnern kooperiert:

- IAV – Automotive Engineering
- Stadt Braunschweig
- Nordsys GmbH
- Volkswagen AG

Die assoziierten Partner bilden dabei das „Technical Advisory Board (TAB)“ und nahmen in dieser Rolle an Experten-Workshops sowie -Reviews für die entwickelten Konzepte und Ergebnisse teil.

Der Stadt Braunschweig, als assoziierter Partner, kam dabei eine besondere Rolle zu, da sämtliche Umsetzungen im digitalen Testfeld AIM zur Realisierung der ViVre-Anwendungsszenarien im Realverkehr eng mit der Stadt Braunschweig abgestimmt und koordiniert wurden. Die Abstimmungen mit der Stadt Braunschweig umfassten dabei z.B. die Auslegung der Anwendungsszenarien, Genehmigungen von Lichtsignalzeitenplänen oder der Abnahme der Use-Cases vor Ort.

## 2. Eingehende Darstellung

In den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten technisch-wissenschaftlichen Ergebnisse des Verbundvorhabens ViVre (Vernetzung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen für nachhaltige Mobilitätslösungen) beschrieben. Die Kapitel unterteilen sich dabei in die wichtigsten thematischen Schwerpunkte, welche im Verbundvorhaben erforscht und entwickelt wurden.

### Digitalisierungs- und Virtualisierungsmöglichkeiten

Ziel des Projektes ViVre war es, die Vernetzung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen für zentrale Verkehrsknoten zu erforschen und damit Bausteine für innovative und nachhaltige Mobilitätslösungen zu erarbeiten. Insbesondere wurde dabei das Konzept einer virtuellen Haltestelle detailliert betrachtet, seine Umsetzung unter verschiedenen Aspekten untersucht und im Straßenverkehr demonstriert.

#### Konzepte

Die Verkehrsinfrastruktur ist maßgebend für den Straßenverkehr und bietet Verkehrsteilnehmern Raum und Orientierung für die Realisierung von (verkehrlicher) Mobilität, um sich innerhalb des öffentlichen Raums zu bewegen. Derzeit ist die Straßeninfrastruktur auf nicht-autonome Fahrzeuge ausgelegt. Mit zunehmendem Fortschritt im Bereich des autonomen Fahrens und Verbreitung neuer Mobilitätsformen, wie On-Demand-Busverkehre, Carsharing oder Fahrradverleihsysteme (vgl. Jacoby & Wappelhorst (2016); BBSR (2015)), stellt sich allerdings die Frage, ob die Verkehrsinfrastruktur in ihrer jetzigen Ausprägung für diese neuen Technologien und Dienste geeignet ist bzw. inwiefern sie an dessen Bedürfnisse und Potentiale angepasst werden kann.

Im ersten Schritt sollten die Elemente der Verkehrsinfrastruktur als Grundlage für die Bildung konkreter Anwendungsfälle im weiteren Projektverlauf spezifiziert werden – entweder in Verbindung mit der virtuellen Haltestelle oder auch als ein eigener Use Case. Dabei sollten sowohl die Vielfalt dieser Elemente und ihrer Digitalisierungs- und Virtualisierungspotenziale, als auch mögliche Zusammenhänge und Synergien aufgezeigt werden.

Diese Ansätze wurden schwerpunktmäßig im Rahmen des Arbeitspakets „Identifikation von Digitalisierungs- und Virtualisierungsmöglichkeiten von Verkehrsinfrastrukturelementen“ behandelt und in konzeptueller Form zusammengefasst. Eine Recherche zum Stand der Wissenschaft und Technik zeigte ein breites Feld von aktuellen Forschungsergebnissen und Lösungsansätzen auf, die die Relevanz und das Potenzial dieser Thematik unterstreichen.

Für eine einheitliche Formulierung ging man von folgenden Definitionen aus:

- Den Prozess, bei dem analoge Informationen digitalisiert, d.h. in eine aus diskreten Werten bestehende maschinenlesbare Form umgewandelt werden, bezeichnet man als *Digitalisierung*.
- Unter *Virtualisierung* versteht man die Umwandlung der digitalen Information derart, dass sie auf einem abstrakten Level vom Nutzer wahrgenommen werden kann. Daraus ergibt sich, dass die Virtualisierung eine Digitalisierung voraussetzt, aber nicht umgekehrt.
- Als *Verkehrsinfrastrukturelemente* werden alle Objekte im Straßenverkehr bezeichnet, die den Straßenverkehr funktional und organisatorisch beeinflussen und steuern (beispielsweise das Straßennetz, die Verkehrszeichen sowie Halte- und Parkmöglichkeiten).

Die Vielzahl der identifizierten Verkehrsinfrastrukturelemente ließ sich in fünf Gruppen unterteilen:

1. Die Gruppe **Halten & Parken** beinhaltet Verkehrsinfrastrukturelemente, die dem temporären oder längerfristigen Abstellen von Fahrzeugen (z.B. Autos, Fahrräder) dienen. Es konnten Haltestellen, Park- und Stellplätze sowie Ladezonen als Elemente identifiziert werden.
2. Die **Lichtsignalanlagen** (LSA, im Volksmund auch Ampeln) werden in zwei Arten unterschieden. Die Verkehrsampeln, die dafür Sorge tragen, Verkehr effizient und sicher zu steuern, und die Fußgängerampeln, welche Passanten das sichere Überqueren von Straßen ermöglichen sollen. Des Weiteren zählen Warnsignal-, Sondersignal-Anlagen und Engstellensignalisierungen ebenfalls zu dieser Gruppe und werden zum Beispiel an Bahnübergängen, Baustellen und Gefahrenstellen eingesetzt, um eine erhöhte Aufmerksamkeit beim Verkehrsteilnehmer zu erzeugen.
3. Die **Verkehrszeichen** erfüllen die Aufgabe der Mitteilung von Verkehrsregeln an die Verkehrsteilnehmer. In der Straßenverkehrsordnung (StVO) sind vier Varianten von Verkehrszeichen definiert: Gefahrenzeichen, Vorschriftzeichen, Richtzeichen und Verkehrseinrichtungen. Diese werden durch die vom ADAC definierten Zusatzzeichen ergänzt, welche gewisse Einschränkungen der Hauptzeichen definieren und Sonstige Verkehrszeichen, zu denen auch das Grünpfeilschild und militärische Sonderzeichen für die Tragfähigkeit von Brücken und Straßen mit beschränkter Tragkraft zählen.
4. Bei **Verkehrsteilnehmern** wird zwischen non-vulnerable und vulnerable unterschieden. Zu den ersten zählen Kraftfahrzeuge jeglicher Art. In der zweiten Gruppe (Vulnerable Road User, VRU) werden Fußgänger, Fahrer von Fahrrädern und Motorrädern sowie Elektrokleinstfahrzeugen zusammengefasst.
5. In der Gruppe **Straßennetz** sind die Infrastrukturelemente zusammengefasst, welche die Fahrbahn und deren Nutzung betreffen. Dazu zählen die Fahrbahnoberfläche, Fahrbahnbegrenzungen und der Fahrbahnverlauf, aber auch der Verkehr und die damit verbundene Auslastung des Straßennetzes.

Aus jeder diesen Gruppen wurden einige Digitalisierungs- und Virtualisierungsideen ausgewählt und in Form von konkreten Mobilitätsanwendungen ausformuliert. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die so identifizierten Inhalte.

**Tabelle 2.1: Liste der definierten Mobilitätsanwendungen**

Nr.	Gruppe	Mobilitätsanwendung
K1	Halten & Parken	Digitale Kartierung von Park- und Haltemöglichkeiten
K2		Digitale Belegungserfassung von Haltestellen bzw. Parkraum
K3		Digitale Abrechnung und Parkraumkontrolle
K4	Lichtsignalanlagen	LSA-Priorisierung für vernetzte Rettungsfahrzeuge und Busse
K5		Digitale Engstellensignalisierung
K6	Verkehrszeichen	Virtueller Fußgängerübergang
K7		Digitale Verkehrsschilder
K8		Digitale Baustellenschilder
K9		Verkehrsschilder ohne physische Instanz
K10		Digitaler Leitpfosten
K11	Verkehrsteilnehmer	Durchschaubare Mauer
K12		Digitaler Blinker, digitales Bremslicht
K13		Digitales Blaulicht
K14		Stauende-Warnung
K15		Vernetztes Warndreieck

K16		Rotlicht-Verletzungswarndienst
K17		Warnung vor Fußgängerquerung
K18		Kooperativer adaptiver Geschwindigkeitsregler
K19		ÖPNV-Position und -Kapazität
K20	Straßennetz	Digitaler Straßenverkehr
K21		Virtuelle Fahrstreifen- und Fahrbahnbegrenzung
K22		Digitale Fahrbahn
K23		Virtuelle Verkehrsführung
K24		Digitale Baustelle
K25		Digitaler lokal beschränkter Verkehr

### *Bewertung*

Im nächsten Schritt beschäftigte man sich mit der Analyse und Bewertung der technischen Realisierbarkeit der erarbeiteten Konzepte. Nach der Identifikation der relevanten Aspekte wurden hier Bewertungskriterien in Form von Forschungsfragen erarbeitet. Die daraus resultierende Umfrage wurde innerhalb des Projektteams durchgeführt und ausgewertet.

#### *- Bewertungsrelevante Aspekte*

Die Umsetzung der Digitalisierungs- und Virtualisierungskonzepte und die Bereitstellung der gewonnenen Informationen an Verkehrsteilnehmer vor oder während der Fahrt als Beitrag für das „Verkehrsmanagement der Zukunft für vernetztes und automatisiertes Fahren“ (Verkehr 2.0) ist komplex und beinhaltet verschiedene Stufen bei der Realisierung und dem Betreiben solcher Dienste. Abbildung 1 stellt die identifizierten Ebenen dar, welche für die technische Umsetzung erforderlich sind. Diese sind nachstehend kurz beschrieben:

#### Stufe 1: Identifikation der Infrastrukturelemente und Anforderungsanalyse:

In dieser Stufe werden die einzelnen Verkehrsinfrastrukturelemente systematisch identifiziert, digitalisiert und/oder virtualisiert. Die Frage der Notwendigkeit und Vorteile der Digitalisierung und/oder der Virtualisierung der ausgewählten Verkehrsinfrastrukturelemente ist auch hier adressiert, dazu zählen auch die Probleme, die dadurch gelöst werden können.

#### Stufe 2: Digitalisierungs- und Virtualisierungstechnik:

Diese Stufe befasst sich mit dem Konzept der Digitalisierung und Virtualisierung des ausgewählten Verkehrsinfrastrukturelementes. Dazu zählen auch die Prozesse für die Datenerfassung, Verarbeitung und die Generierung der digitalisierten und virtualisierten Information. Darüber hinaus werden die verwendeten Technologien und Standards zur Digitalisierungs- und Virtualisierungslösungen betrachtet.

#### Stufe 3: Datenmanagement:

Diese Stufe befasst sich mit dem Konzept der Modellierung, Speicherung und des Verwaltens der Daten in digitalisierter und virtualisierter Form. Die Datensicherung und -sicherheit (Replizierbarkeit, Backup, Zugriff), Datenverfügbarkeit (24/7-Betrieb) sowie das Betreiben der Daten (z.B. in der Cloud-Plattform, Big Data) und die Datenqualität (Aktualität, Gültigkeit, Vollständigkeit, Korrektheit, Konsistenz) werden auch adressiert.

#### Stufe 4: Datenkommunikation:

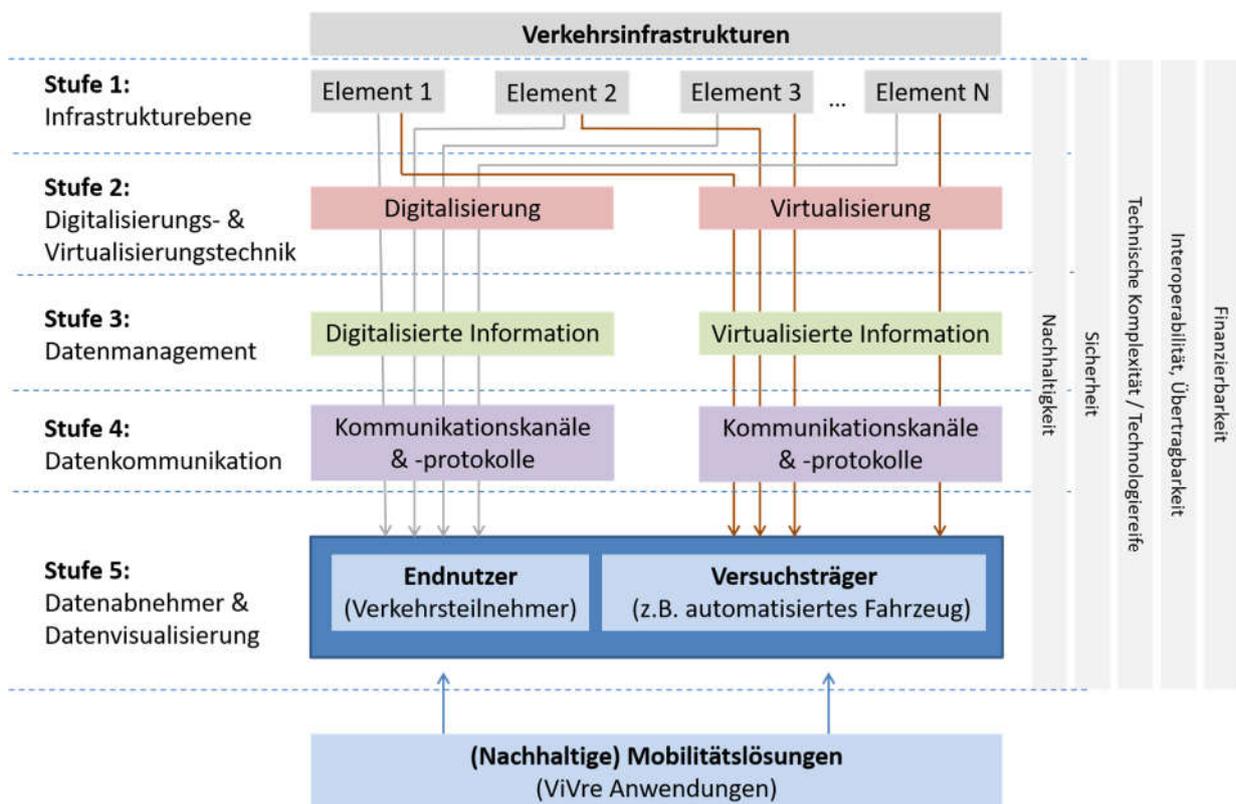
Diese Stufe befasst sich mit dem Konzept und Umsetzung für die Kommunikationsschnittstellen, um digitalisierte und virtualisierte Informationen zwischen Datenprovider (z.B. das Verkehrsmanagementsystem) und Datennutzer (z.B. vernetztes und automatisiertes Fahrzeug) auszutauschen. Dazu zählen die Sicherung der Kommunikation, die verwendeten Technologien

für die Kommunikationsnetze und -protokolle sowie die Art und Qualität der Datenkommunikation (Datenvolumen, Datenrate, Echtzeitübertragung).

#### Stufe 5: Datenbereitstellung und -darstellung:

Diese Stufe befasst sich mit dem Konzept für den Empfang, die Interpretation (z.B. Dekodierung) und die Darstellung (z.B. Visualisierung) der digitalisierten und virtualisierten Informationen auf Endgeräten (z.B. VR-Brille) oder im vernetzten und automatisierten Fahrzeug (Mensch-Maschine-Schnittstelle). Die Anforderungen an Visualisierungsgeräte werden auch untersucht. Da die meisten Dienste die Information über die aktuelle Position des Fahrzeugs oder Verkehrsteilnehmer benötigen (z.B. für die Navigation), ist die GNSS-Technologie für die Verortung relevant.

Die Informationen über Verkehrsinfrastrukturelemente werden systematisch erfasst und aufbereitet und fließen an die Datenabnehmer. Je nach Anwendung erfolgt eine entsprechende Verarbeitung und Darstellung auf der Nutzerebene. Neben den rein technischen Aspekten spielen die ebenenübergreifenden Faktoren – wie Interoperabilität, Finanzierbarkeit oder Sicherheit – auch eine wichtige Rolle und sind bei dem Entwurf und der Realisierung solcher intelligenten Verkehrssysteme zu berücksichtigen.



**Abbildung 1: Stufen der technischen Realisierung der Digitalisierung und Virtualisierung der Verkehrsinfrastrukturen auf Datenebene.**

Die technische Realisierung der neuen Mobilitätsdienste basiert auf digitalisierten und virtualisierten Informationen über die Straßeninfrastrukturelemente und erfordert den Ausbau und die Anpassung der jetzigen Dienste auf Verkehrsmanagement-, Infrastruktur-, Fahrzeug- (z.B. die Anpassung der Automationsfunktion), Endgerät- und Anwendungsebene. In Abbildung 2 sind die

Systemkomponenten und Akteure schematisiert. Die Pfeile kennzeichnen die Zusammenhänge innerhalb des Systems. Das Verkehrsmanagementsystem agiert dabei als zentrales Element.

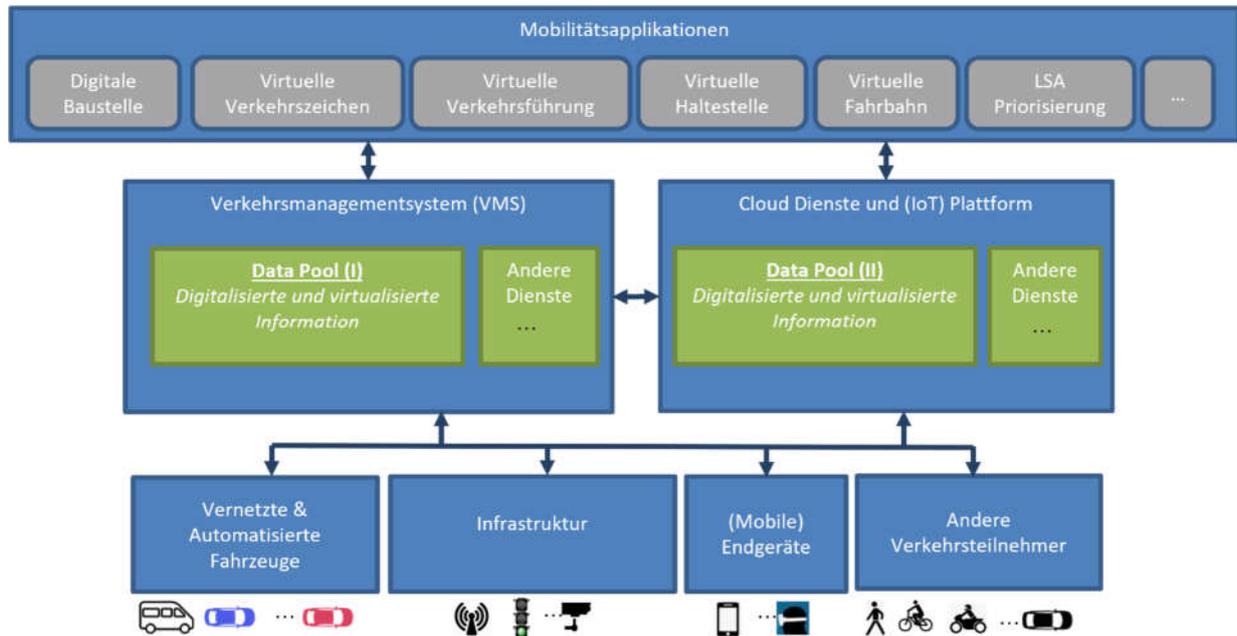


Abbildung 2: Systemkomponenten und Akteure der Mobilitätsdienste.

Außerdem ist die Notwendigkeit der Beteiligung verschiedener Stakeholder in unterschiedlichen Bereichen und deren Interessen zu bedenken. Je nach Anwendung können diese sein:

- Straßenbauamt,
- Automobilhersteller / Fahrzeugentwickler,
- Kommunen,
- Länder,
- Bund,
- Verkehrsdatenbetreiber,
- Endgeräte-App Entwickler,
- Polizei,
- Politik,
- Gesetzgebung,
- Verkehrsteilnehmer,
- Endnutzer,
- Feuerwehr,
- Verkehrsmanager,
- Innovatoren & Behörden,
- Mobilitätsanbieter & -betreiber (öffentlich und privat),
- Verkehrsingenieure & -planer,
- Berater & Systemintegratoren,
- Bauingenieure und Stadtplaner,
- Telekommunikationsnetzbetreiber.

Eine vollständige Ermittlung, Auswertung und Gegenüberstellung der Interessen aller Stakeholder stand nicht im Fokus des Projekts. Daher versuchte man hier nur für einige Vertreter dieser Liste die Interessen exemplarisch mithilfe der sogenannten Charette-Methode zu ermitteln. Dabei wurden zunächst die aus der Sicht des jeweiligen Stakeholders relevanten Nutz- bzw. Schmerzfaktoren formuliert und diese dann auf die Interessenschwerpunkte übersetzt. Das konsolidierte Ergebnis (siehe Tabelle 2.2) soll einen Überblick über die Vielfalt der zu berücksichtigenden Aspekte geben. Bei der Umsetzung eines konkreten Konzepts empfiehlt es sich, die betroffenen Stakeholder zu identifizieren und eine tiefere Analyse unter Berücksichtigung lokaler Besonderheiten und mit Hinblick auf mögliche Interessenkonflikte vorzunehmen.

**Tabelle 2.2: Identifizierte Stakeholder-Interessen bezogen auf Digitalisierung und Virtualisierung der Verkehrsinfrastruktur**

Stakeholder	Nutzen/Schmerz	Interessenschwerpunkte
<b>Konventionelle Fahrzeuge</b>	Kann digitalisierte/virtualisierte Informationen nicht wahrnehmen	Zusätzlicher Informationskanal
	Verarbeitung der Information durch den Fahrer notwendig	Geeignete HMI
	Möglicher Ausschluss aus dem Straßenverkehr	Zulassung
	Profitieren vom verbesserten Verkehrsfluss	Kurze Reisezeit
	Profitieren von erhöhter Verkehrssicherheit	Hohe Verkehrssicherheit
<b>Nutzer (Autofahrer, VRU, Shuttle-Nutzer)</b>	Kontinuierliche Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastrukturinformationen	Regelkonformes Fahren
	Dichteres Haltestellennetz	Kurze Wege
	On-Demand-Mobilität	Flexibilität
	Routing zur Haltestelle	Leichte Wegfindung
	Integration in die Verkehrsinfrastruktur	Hohe Verkehrssicherheit
	Zugang zu den Diensten erfordert Endgerät, Nutzerkonto	Barrierefreiheit / Datenschutz
<b>Kommune</b>	Neue individualisierte Mobilitätslösungen	Erhöhter Komfort / Zeitersparnis
	Umbau der Infrastruktur notwendig	Geringe Investitionskosten
	Verbesserung des Verkehrsflusses, Schonung des Straßennetzes	Entlastung des Straßenverkehrs
	Innovative, moderne Mobilitätsangebote	Attraktivität der Gemeinde
	Effizientere und emissionsarme Verkehrsgestaltung	Reduzierung von (CO <sub>2</sub> ) Emissionen
<b>Fahrzeugentwickler</b>	Höhere Lebensqualität	Verbessertes Stadtbild
	Neue Anforderungen an die Fahrzeuge	Produktweiterentwicklung
	„Coole“ neue Features	Verkaufsargument / Mehrwert
	Aufbau einer Datenbank mit Verkehrsdaten	Wiederverwendung für Sicherheitsoptimierung / mögliche Monetarisierung
	Aufwendige Abstimmungen mit den Betreibern von Verkehrsinfrastrukturen und Fahrzeugherstellern	Standardisierung / Schnittstellenaufbau
	Agieren auf neuem Technologiefeld	Markendifferenzierung
Konventioneller Absatzmarkt leidet	Geld verdienen	

- *Formulierung der Bewertungskriterien*

Als Grundlage für die Entwicklung der Bewertungsmethodik diente die in Fornauf (2015) erarbeitete Vorgehensweise. Die definierten Digitalisierungs- und Virtualisierungskonzepte sind im Allgemeinen nur auf einer qualitativen Ebene bewertbar, sodass sich für die *verbal-argumentative* Methode entschieden wurde (Kategorie: nichtformalisiert). Hier basiert die Bewertung auf Erfahrungswerten und der persönlichen Einschätzung der im Bewertungsprozess beteiligten Personen in Form eines argumentierten Gesamturteils. Als ein großer Vorteil dieser Methode kann ein vergleichsweise geringer Zeit- und Arbeitsaufwand angesehen werden. Auch ist sie für ein breites Anwendungsspektrum gut geeignet. Auf der anderen Seite sind solche Einschätzungen oft subjektiv und einseitig, was zu einer geringeren Genauigkeit des Bewertungsergebnisses führt. Um diesen negativen Effekt zu minimieren, soll ein möglichst vielschichtiger Personenkreis an der Bewertung teilnehmen. Außerdem sind die Bewertungskriterien so zu definieren, dass eine mehrdeutige Interpretation weitestgehend ausgeschlossen werden kann.

Entlang des in Abbildung 1 dargestellten Prozesses ergaben sich viele Fragestellungen, die die technische Realisierung von Digitalisierung und Virtualisierung von Verkehrsinfrastrukturelementen betreffen. Diese Fragen wurden zunächst gesammelt, als Kriterien aufgefasst und thematisch gruppiert, sodass sich für jede Gruppe eine Anzahl von Indikatoren ergab. Die Indikatoren verdeutlichten jeweils den Gruppenschwerpunkt sowie dessen Aspekte und sollten als Hilfestellung bei der Argumentation dienen. So konnten fünf Kriteriengruppen erstellt werden:

1. Technische Komplexität,
2. Technologiestand,
3. Finanzierung und Monetarisierung,
4. Sicherheit im Sinne von Safety und Security,
5. Interoperabilität und Übertragbarkeit.

Als nächstes bestand die Aufgabe darin, für jede der Kriteriengruppen eine Forschungsfrage zu formulieren, welche schließlich auf einer Skala von 1 bis 5 bewertet werden kann, wobei eine 1 immer die schlechteste Ausprägung bedeutet (sehr komplex, sehr teuer, sehr schlecht usw.) und eine 5 die beste. Die Tabelle 2.3 enthält die Indikatoren der ersten Kriteriengruppe.

**Tabelle 2.3: Indikatoren zur Bewertung der technischen Komplexität**

Forschungsfrage		Bewertung
<b>Wie hoch ist die Komplexität der technischen Realisierung?</b>		1 bis 5
Nr.	Indikatoren	
1	<b>Vernetzung:</b> Wie hoch ist der Vernetzungsgrad des Konzepts? Müssen mehrere Systeme zur Realisierung des Konzepts kooperieren?	
2	<b>Systemanzahl:</b> Wie viele Teilsysteme sind für die Funktion des Konzepts erforderlich?	
3	<b>Informationsverarbeitung:</b> Muss das System in der Lage sein, komplexe Zusammenhänge zu erfassen und zu interpretieren?	
4	<b>Bauliche Änderungen:</b> Sind baulichen Änderungen an der Verkehrsinfrastruktur zur Realisierung des Konzepts erforderlich?	
5	<b>Marktdurchdringung:</b> Wie hoch muss die Marktdurchdringung der eingesetzten Technologie sein, damit das Konzept sinnvoll genutzt werden kann?	
6	<b>Datennutzer:</b> Für welche Verkehrsteilnehmer müssen die digitalisierten und/oder virtualisierten Informationen zur Verfügung gestellt werden? [Fußgänger, Radfahrer,	

	Motoradfahrer, Autofahrer, nicht vernetztes Fahrzeug, vernetztes oder automatisiertes Fahrzeug, Autoinsassen etc.]
7	<b>Darstellungsform:</b> In welcher Form wird die digitalisierten u/o virtualisierte Information dargestellt (auf Fahrzeug- oder Endgeräteseite)? [textuell, sprachlich, visuell etc.]

### Ergebnisse der Bewertung

Basierend auf der vorgestellten Methode und den definierten Fragestellungen wurden insgesamt 25 Onlinefragebögen entwickelt. Dabei stand jeweils ein Fragebogen pro Konzept zur Verfügung, der alle fünf Forschungsfragen mit dazugehörigen Indikatoren berücksichtigte. Zusätzlich war ein Kommentarfeld verfügbar, in dem die Teilnehmer angehalten waren, ihre Entscheidung zu begründen.

Die Fragebögen wurden innerhalb des Projektarbeitspakets verteilt. Damit wurden unterschiedliche Firmen und Institute mit Fachwissen aus verschiedenen Teilbereichen des Entwicklungsprozesses von autonomen Fahrsysteme an der Umfrage beteiligt. Auf diesem Weg konnte ein Teilnehmerkreis von insgesamt 14 Personen erreicht werden. Da die einzelnen Fragebögen unabhängig voneinander ausgefüllt wurden, konnte trotzdem ein Vergleich über die Forschungsfragen gezogen werden.

#### - Evaluation nach Forschungsfragen

Im ersten Schritt wurden die Ergebnisse nach den einzelnen Forschungsfragen betrachtet. Dazu wurde der Mittelwert der Ratings für jedes Konzept ermittelt und mit denen der anderen Konzepte verglichen. Im Gesamtbild ließ sich über alle Konzepte ein breitverteiltes Rating erkennen. Hier wird ebenfalls exemplarisch das Ergebnis für die Frage nach der *Technischen Komplexität* vorgestellt:

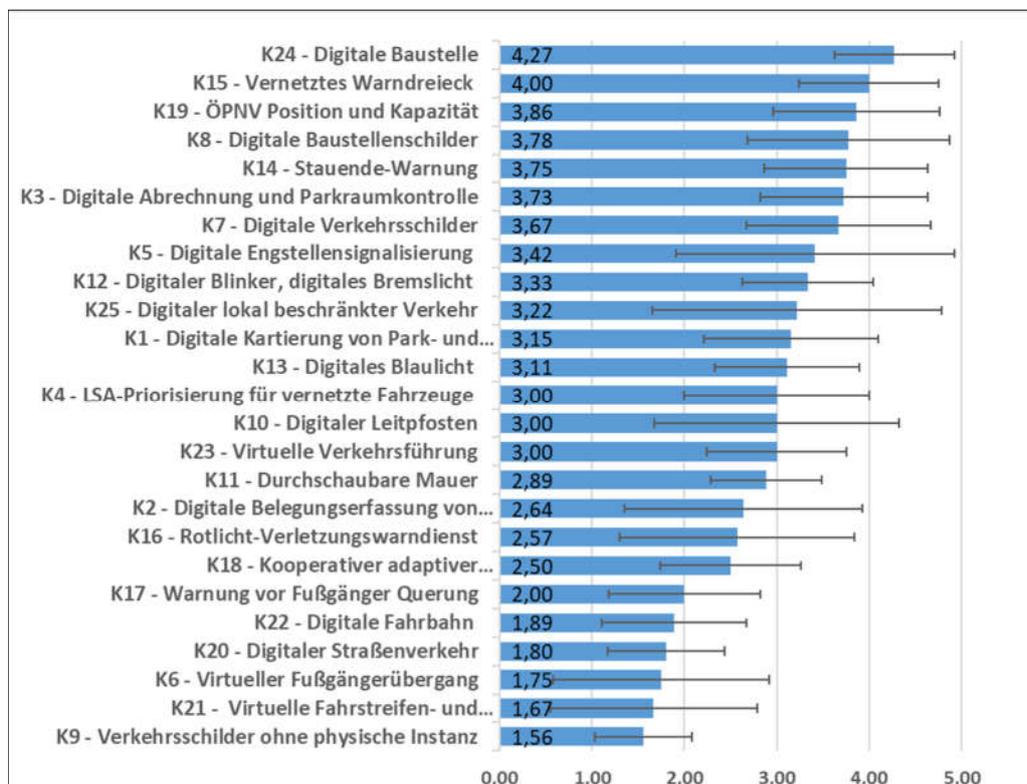


Abbildung 3: Ratingergebnis Technische Komplexität

Die Ratings für diese Frage reichen von 1,56 bis 4,27 (Abbildung 3). Insgesamt sechs Konzepte weisen ein Durchschnittsrating von 2,00 oder kleiner auf und sind damit als sehr komplex einzustufen. Die beiden Konzepte mit der geringsten Wertung sind „Verkehrsschilder ohne physische Instanz“ und „Virtuelle Fahrstreifen- und Fahrbahnbegrenzungen“. Lediglich die Konzepte „Vernetztes Warndreieck“ und „Digitale Baustelle“ erreichen einen Schnitt von vier oder höher und werden somit als wenig komplex eingeordnet.

Sowohl für das Konzept „Verkehrsschilder ohne physische Instanz“ als auch für das Konzept „Virtuelle Fahrstreifen- und Fahrbahnbegrenzung“ begründeten die Umfrageteilnehmer ihre Ratings mit einer hohen Systemanzahl und hohem Vernetzungsgrad sowie einer schwierigen Virtualisierung für Motorradfahrer, Fußgänger oder Radfahrer. Zudem wurde eine hohe erforderliche Marktdurchdringung des Konzepts, um den gewünschten Nutzen zu erzielen, als Argument für seine hohe technische Komplexität angebracht. Für das Konzept „Verkehrsschilder ohne physische Instanz“ wiesen einige Teilnehmer darauf hin, dass keine baulichen Änderungen für die Umsetzung des Konzepts erforderlich sind und dass die zu übertragenden Daten einen geringen Komplexitätsgrad aufweisen. Für das Konzept „Virtuelle Fahrstreifen- und Fahrbahnbegrenzung“ wurden zusätzlich jedoch die erforderlichen bauliche Änderungen für die Installation optischer Systeme und die komplexen darzustellenden Zusammenhänge als Argument angebracht.

Für das am zweithöchsten bewerteten Konzept „Vernetztes Warndreieck“ wurde eine geringe Systemanzahl und einfach zu verarbeitenden Informationen als Argumente genannt. Zudem verwiesen die Teilnehmer darauf, dass keine baulichen Änderungen erforderlich sind. Herausforderungen sahen die Teilnehmer darin, die erforderliche Marktdurchdringung zu erreichen, damit das Konzept seinen Mehrwert gegenüber konventionellen Warndreiecken ausspielen kann. Argumente für eine geringe technische Komplexität des Konzepts „Digitale Baustelle“ waren, dass auf bereits etablierte Technologien wie Kartendienste zurückgegriffen werden kann und keine komplexen Informationen verarbeitet werden müssen. Allerdings sahen die Teilnehmer die Datenerfassung als kritischen Punkt. Hier wurde argumentiert, dass die Informationen über Baustellen zwar bereits vorliegen, diese aber zunächst digitalisiert werden müssen. Hierdurch kann ein erheblicher Arbeitsaufwand entstehen.

#### - Gesamtevaluation

Um eine abschließende Bewertung der technischen Realisierbarkeit der vorgestellten Konzepte vorzunehmen, wurde deren Abschneiden über alle Forschungsfragen analysiert. Anstatt den Mittelwert über alle Ratings zu bilden, wurde an dieser Stelle betrachtet, welche Konzepte in vielen Forschungsfragen über- bzw. unterdurchschnittlich abgeschnitten haben. Dadurch konnte eine Verfälschung durch stark unterschiedliche Ratings in den Forschungsfragen ausgeschlossen werden.

Abbildung 4 zeigt das jeweils geringste Rating der Konzepte über alle Forschungsfragen. Die grün markierten Konzepte „Digitaler Blinker, digitales Bremslicht“, „Vernetztes Warndreieck“ und „Digitale Baustelle“ haben somit in allen Forschungsfragen mindestens den im Diagramm angegebenen Wert erreicht. Diesen Konzepten wird somit eine gute technische Realisierbarkeit zugeschrieben.

Im Gegensatz dazu zeigt die Abbildung 5 das jeweils höchste Rating über vier Forschungsfragen (da in der Forschungsfrage *Interoperabilität und Übertragbarkeit* alle Konzepte überdurchschnittlich abgeschnitten haben, wurde diese für die Gesamtbewertung nicht betrachtet). Die Konzepte „Virtueller Fußgängerübergang“, „Virtuelle Fahrstreifen- & Fahrbahnbegrenzung“ sowie „Warnung

vor Fußgängerquerung“ erhielten jeweils ein Rating kleiner als 3,00 und sind gelb markiert. Diese drei Konzepte werden somit als aufwendig bezüglich der technischen Realisierbarkeit klassifiziert.

Die Vorgehensweise und Ergebnisse wurden in Touko et al. (2022) veröffentlicht.

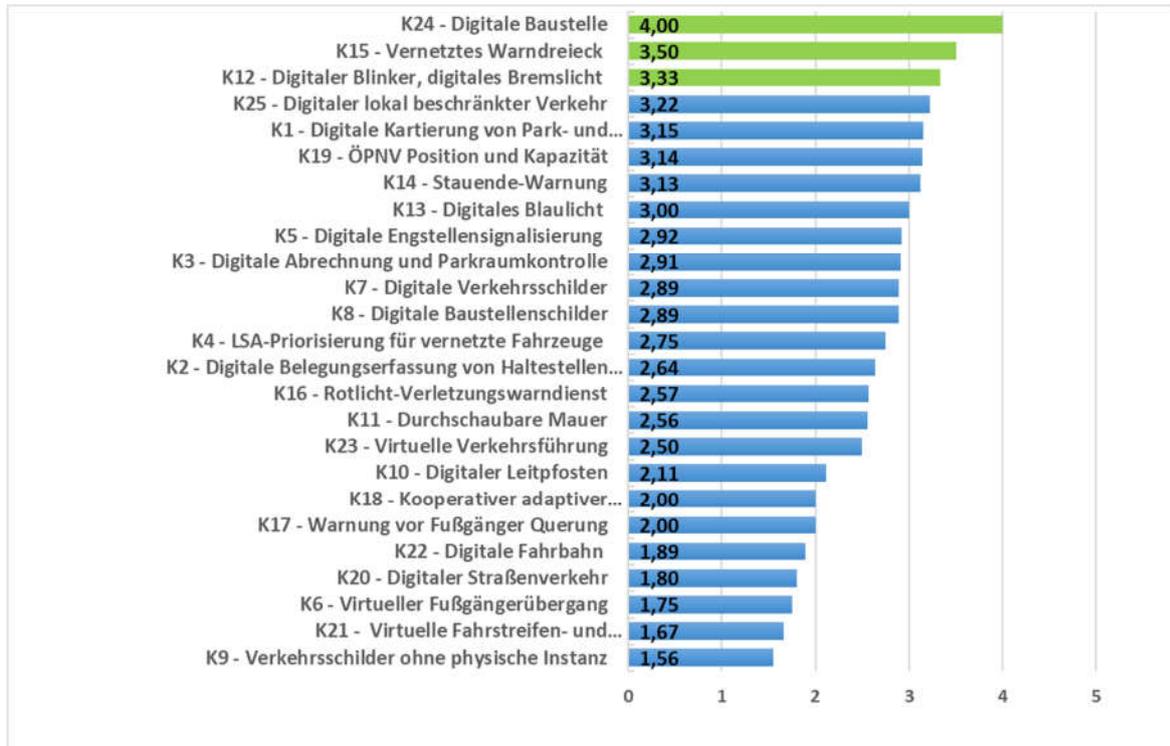


Abbildung 4: Geringstes Rating-Ergebnis über alle Forschungsfragen

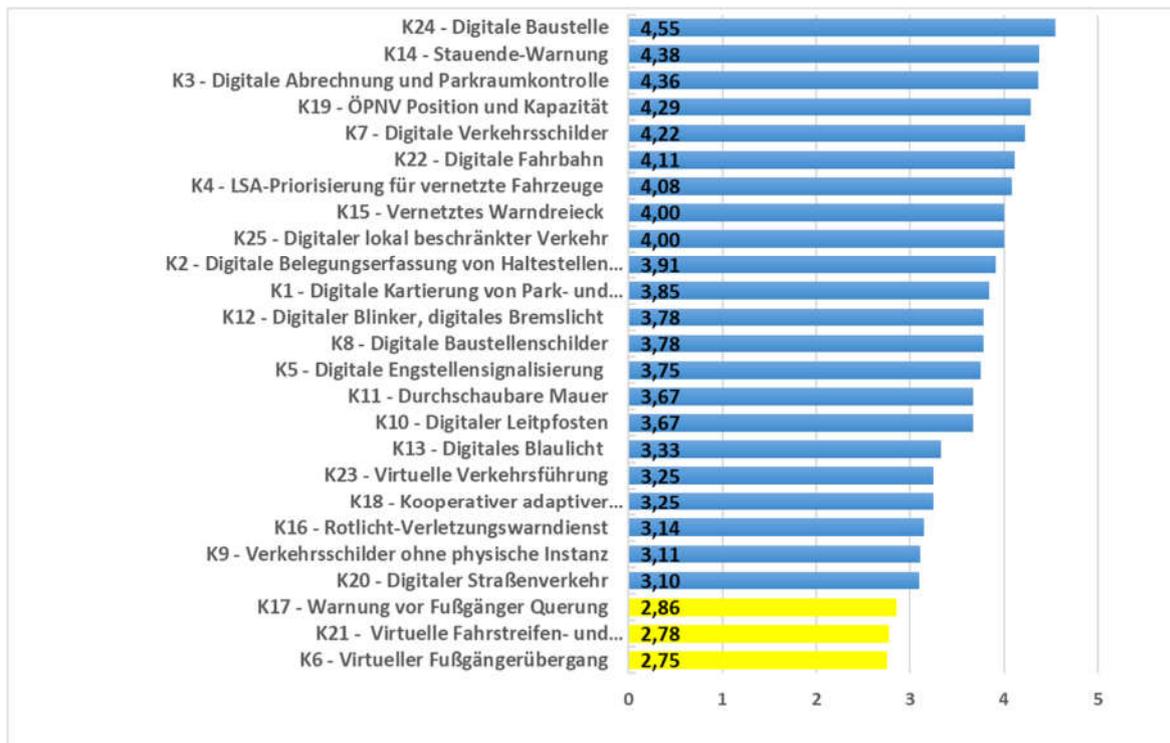


Abbildung 5: Höchstes Rating-Ergebnis über alle Forschungsfragen

### Schlusswort

Durch die Digitalisierung und/oder Virtualisierung der Verkehrsinfrastrukturen werden die verfügbaren Verkehrsinformationen ergänzt und erweitert. Aus der Kombination zwischen intelligenten Verkehrssystemen, verbesserten Verkehrsinformationen und intelligentem Verkehrsmanagement der Zukunft können neue Mehrwerte entstehen, welche zur nachhaltigen Mobilität beitragen, wie:

- Erhöhung der Verkehrssicherheit: Vermeidung von Konflikten/Gefahrensituationen, z.B. durch frühzeitige Durchführung der Fahrmanöver dank Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern oder durch die Informationen über die Straßenschäden, welche durch die digitale Fahrbahn bereitgestellt werden.
- Verbesserung des Verkehrsflusses: Verkürzung oder Vermeidung von nicht erforderlichen Wegen oder bessere Verteilung des Verkehrsaufkommens (digitaler Baustellen- oder Verkehrslageinformationen).
- Erhöhung der Verkehrseffizienz: Effizienzgewinne in Form von Geldersparnis (z.B. aufgrund des optimierten Fahrverhaltens) oder gewonnener Zeit (Zeitersparnis aufgrund kurzer Wege).
- Erhöhung des Fahrkomforts: der Nutzer kann sich während der Fahrt entspannen (Stressreduzierung) oder arbeiten und soziale Interaktion durchführen und braucht sich nicht über die gefährlichen Verkehrssituationen (komplexe Kreuzungen oder gefährliche Kurven) während der Fahrt zu kümmern.
- Verringerung der Emission: umweltfreundlicherer Verkehr durch Verringerung der Emission (optimiertes Fahrverhalten, verkürzte Fahrzeiten).
- Treiber neuer Geschäftsmodelle: die Digitalisierung und/oder Virtualisierung bietet einen optimalen Rahmen für das „autonome Fahrzeug“ und lässt dadurch neue Geschäftsmodelle entstehen (z.B. bedarfsorientierter Verkehrsdienst mit virtuellen Haltestellen).
- Innovationspotenzial: die Digitalisierung und/oder Virtualisierung schafft die Grundlagen für weitere Entwicklungen und neuartige Ideen.

### Use Cases, Szenarien und Anforderungsdefinitionen

Im Rahmen der Use-Case-, Szenarien- und Anforderungsdefinition wurde zu Beginn des Verbundvorhabens ein Anforderungsworkshop durchgeführt, zu dem alle Verbundpartner beigetragen haben. Im Anforderungsworkshop wurden in einem ersten Schritt projektbezogene Storyboards entwickelt. Ausgehend von den Storyboards konnten im zweiten Schritt relevante Use-Cases identifiziert werden. Diese Use Cases wurden danach in kleinere Einheiten (Szenarien) heruntergebrochen, um im letzten Schritt ausgehend von den Szenarien ganz spezifische Anforderungen ableiten zu können. Um die Anforderungen zu erheben wurden inhaltliche, systemspezifische Cluster gebildet, die aus Experten der Verbundpartner bestanden. Durch einen iterativen und inkrementellen Austausch im Rahmen der systemspezifischen Cluster fand eine kontinuierliche Konkretisierung und Detaillierung der Anforderungen statt, so dass die letzte Iterationsphase mit der Überarbeitung der funktionalen Anforderungen und deren Überführung in die anderen Projektbereiche endete.

Innerhalb der rechtlichen Begleitforschung wurden die identifizierten Use-Case-, Szenarien- und Anforderungen dahingehend untersucht, inwiefern allgemeine Verhaltensvorschriften und straßenverkehrs-rechtliche Gebote auf automatisierte Fahrzeuge übertragbar sind. Im Mittelpunkt der Untersuchung standen rechtliche Überlegungen zu virtuellen Haltestellen, gegründet auf einer Darlegung, wo und unter welchen Umständen das Halten von Fahrzeugen auf öffentlichen Straßen zulässig ist. Aus dieser Use-Case-übergreifenden Betrachtung, konnten Rückschlüsse gezogen werden, welche Anwendungsfälle sich aus rechtlicher Sicht zur weiteren Erforschung anbieten.

Ausgehend von diesen Arbeiten wurde ein Anforderungs- und Szenarien-katalog erstellt, der während der Laufzeit des Verbundvorhabens permanent überarbeitet und aktualisiert wurde, falls sich neue Erkenntnisse ergaben. Ein Auszug aus dem Anforderungs- und Szenarien-katalog findet sich in Tabelle 2.4.

**Tabelle 2.4: Auszug aus Anforderungs- und Szenarien-katalog**

Name	Cluster	Beschreibung
<b>Use-Case 1</b>	<b>Versuchsträger</b>	<b>Befahren von virtuellen Haltestellen</b>
Szenario 1.1	Versuchsträger	Haltestelle in zweiter Reihe
Szenario 1.2	Versuchsträger	Haltestelle ist Haltebucht
<b>Use-Case 2</b>	<b>Versuchsträger</b>	<b>Querung eines Verkehrsknotenpunktes</b>
Szenario 2.1	Versuchsträger	Geradeausfahrt durch Verkehrsknoten mit LSA
Szenario 2.2	Versuchsträger	Geradeausfahrt durch Verkehrsknoten ohne LSA
Szenario 2.3	Versuchsträger	Linksabbiegen an einer Kreuzung mit LSA bei vorfahrtberechtigtem Gegenverkehr
Szenario 2.4	Versuchsträger	Passieren eines Kreisverkehrs
<b>Use-Case 3</b>	<b>Versuchsträger</b>	<b>Kommunikation von virtuellen Haltepunkten</b>
Szenario 3.1	Versuchsträger	Fahrzeug meldet Bedarf an
Szenario 3.2	Versuchsträger	Erzeugung und Senden von bis zu 3 Haltepunkten
Szenario 3.3	Versuchsträger	Fahrzeug/Nutzer bestätigt einen der gewählten Haltepunkte
Szenario 3.4	Versuchsträger	Fahrzeug meldet Eintreffen am Haltepunkt
Szenario 3.5	Versuchsträger	Backend registriert virtuellen Haltepunkt als besetzt
Szenario 3.6	Versuchsträger	Backend löst virtuellen Haltepunkt auf
<b>Use-Case 4</b>	<b>Versuchsträger</b>	<b>Echtzeitlagebild zu möglichen Haltepunkten</b>
Szenario 4.1	Versuchsträger	Offline Kartierung möglicher Haltepunkte
Szenario 4.2	Versuchsträger	Echtzeit-Belegungserfassung durch verteilten Versuchsträger
Szenario 4.3	Versuchsträger	Daten-Fusion
Szenario 4.4	Versuchsträger	Zustands-Monitoring von teilnehmenden Fahrzeugen
<b>Use-Case 5</b>	<b>Versuchsträger</b>	<b>Interaktion mit nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern</b>
Szenario 5.1	Versuchsträger	Fußgänger passiert Zebrastreifen
Szenario 5.2	Versuchsträger	Virtueller Zebrastreifen

Szenario 5.3	Versuchsträger	Fahrzeug überholt langsameren Radfahrer
Szenario 5.4	Versuchsträger	Eintreten von Radfahrern in den Straßenraum
<b>Use-Case 6</b>	Versuchsträger	<b>Priorisierung an LSA geregelten Knotenpunkten</b>
Szenario 6.1	Versuchsträger	Priorisierung an LSA-geregelten Knotenpunkten - Normales Passieren
Szenario 6.2	Versuchsträger	Priorisierung an LSA-geregelten Knotenpunkten - Passieren mit vorübergehendem Halt an virtueller Haltestelle
<b>Use-Case 7</b>	Versuchsträger	<b>Automatisiertes Passieren von auf der Fahrbahn geparkten Fahrzeugen</b>
Szenario 7.1	Versuchsträger	Einspurig (Abschätzung des Gegenverkehrs)
Szenario 7.2	Versuchsträger	Zweispurig (In benachbarte Spur einfädeln)
<b>Use-Case 8</b>	<b>Versuchsträger</b>	<b>Dynamische Routenplanung</b>
Szenario 8.1	Versuchsträger	Kommunikation mit Insassen
Szenario 8.2	Versuchsträger	Dynamische Routenplanung
<b>Use-Case 1</b>	Endnutzer	<b>Nutzerprofil erstellen</b>
Szenario 1.1	Endnutzer	Erstellen des Nutzerprofils mit Eingabe von Nutzer-bedürfnissen
<b>Use-Case 2</b>	Endnutzer	<b>Planung/Buchung einer Fahrt</b>
Szenario 2.1	Endnutzer	Auswahl des Reiseziels und des Zeitpunkts
Szenario 2.2	Endnutzer	Eingabe temporärer Benutzeranforderungen
Szenario 2.3	Endnutzer	Erlangen von Informationen zum Fahrzeugtyp
<b>Use-Case 3</b>	Endnutzer	<b>Virtuelle Haltestelle generieren (ride access und drop off point)</b>
Szenario 3.1	Endnutzer	Abgleich zwischen Nutzerbedürfnissen und Eigenschaften der virtuellen Haltestelle (ride access und drop off point)
<b>Use-Case 4</b>	Endnutzer	<b>Navigation zum Fahrt-Einstiegspunkt</b>
Szenario 4.1	Endnutzer	Benachrichtigung über den Beginn der Fahrt
Szenario 4.2	Endnutzer	Verzögerung eines Benutzers/mehrere Benutzer beim Erreichen des Fahrt-Einstiegspunktes
Szenario 4.3	Endnutzer	Der Benutzer möchte die Fahrt stornieren
Szenario 4.4	Endnutzer	Anzeigen der Route zum Fahrt-Einstiegspunkt
<b>Use-Case 5</b>	<b>Endnutzer</b>	<b>Virtuelle Haltestelle identifizieren</b>
Szenario 5.1	Endnutzer	Das System informiert Endnutzer über Verortung der virtuellen Haltestelle
<b>Use-Case 6</b>	<b>Endnutzer</b>	<b>Aufenthalt an virtueller Haltestelle</b>
Szenario 6.1	Endnutzer	Bereitstellen von Informationen über Ankunftszeit des Fahrzeugs
Szenario 6.2	Endnutzer	Bereitstellen von Informationen über Ankunftszeit weiterer Passagiere
Szenario 6.3	Endnutzer	Der Endnutzer verpasst das Fahrzeug
Szenario 6.4	Endnutzer	Der Endnutzer erreicht die virtuelle Haltestelle zu früh und muss auf Abholfahrzeug warten

Szenario 6.5	Endnutzer	Abholfahrzeug verspätet sich
<b>Use-Case 7</b>	<b>Endnutzer</b>	<b>Fahrzeug erreicht virtuelle Haltestelle</b>
Szenario 7.1	Endnutzer	Identifizierung des Shuttelfahrzeugs
<b>Use-Case 8</b>	<b>Endnutzer</b>	<b>Einsteigen in das Fahrzeug</b>
Szenario 8.1	Endnutzer	Erfolgreiches Einsteigen in das automatisierte Fahrzeug bestätigen
Szenario 8.2	Endnutzer	Verstauen von Gepäckstücken/ medizinische Hilfen/ Kinderwagen
<b>Use-Case 9</b>	Endnutzer	<b>Der Nutzer ist mit dem Shuttle unterwegs</b>
Szenario 9.1	Endnutzer	Position des Shuttles und Prognose der Ankunftszeit
Szenario 9.2	Endnutzer	Umleitung
Szenario 9.3	Endnutzer	Eine Helpline kontaktieren
Szenario 9.4	Endnutzer	Informationen über Störungen / Unterbrechungen
<b>Use-Case 10</b>	Endnutzer	<b>Aussteigen aus dem Fahrzeug</b>
Szenario 10.1	Endnutzer	Benachrichtigung zum Verlassen des Fahrzeuges
<b>Use-Case 11</b>	Endnutzer	<b>Feedback zur Fahrt und Nutzerbeteiligung</b>
Szenario 11.1	Endnutzer	Fahrt bewerten
Szenario 11.2	Endnutzer	Virtuelle Haltestellen bewerten
Szenario 11.3	Endnutzer	Haltepunkte vorschlagen
<b>Use-Case 1</b>	Simulation	<b>Automatisierte Querung eines Verkehrsknotens mit Lichtsignalanlage</b>
Szenario 1.1	Simulation	Erfolgreiche Querung Knotenpunkt
<b>Use-Case 2</b>	Simulation	<b>Fahrt durch einen verkehrsberuhigten Bereich mit Querung eines virtuellen Fußgängerüberweges</b>
Szenario 2.1	Simulation	Bedarfsmeldung Fußgängerüberweg absetzen
<b>Use-Case 3</b>	Simulation	<b>Interaktion der Fahrzeuge mit virtuellen Verkehrszeichen</b>
Szenario 3.1	Simulation	Verkehrsmanagementsystem ermittelt Bedarf für virtuelles Verkehrszeichen selbständig
<b>Use-Case 4</b>	Simulation	<b>Priorisierung an LSA geregelten Knotenpunkten</b>
Szenario 4.1	Simulation	Priorisierung an LSA-geregelten Knotenpunkten - Normales Passieren
Szenario 4.2	Simulation	Priorisierung an LSA-geregelten Knotenpunkten - Passieren mit vorübergehendem Halt an virtueller Haltestelle
<b>Use-Case 5</b>	Simulation	<b>Nutzung der ÖPNV-Infrastruktur / Haltestelle</b>
Szenario 5.1	Simulation	Nutzung einer ÖPNV-Haltestelle (Busbuch)
Szenario 5.2	Simulation	Nutzung einer ÖPNV-Haltestelle (Fahrbahnrandhaltestelle)
<b>Use-Case 6</b>	Simulation	<b>Ein-/Ausstieg eines Endnutzers in der Nähe eines LSA gesteuerten Knotenpunktes</b>
Szenario 6.1	Simulation	Ein-/Ausstieg eines Endnutzers unmittelbar vor einem LSA

		gesteuerten Knotenpunkt (Zeitinsel)
Szenario 6.2	Simulation	Ein-/Ausstieg eines Endnutzers unmittelbar hinter einem LSA gesteuerten Knotenpunkt
<b>Use-Case 7</b>	Simulation	<b>Erzeugung der virtuellen Haltestelle</b>
Szenario 7.1	Simulation	Erfolgreiche Erzeugung der virtuellen Haltestelle

### Kooperations-, Informations- und Kommunikationskonzepte

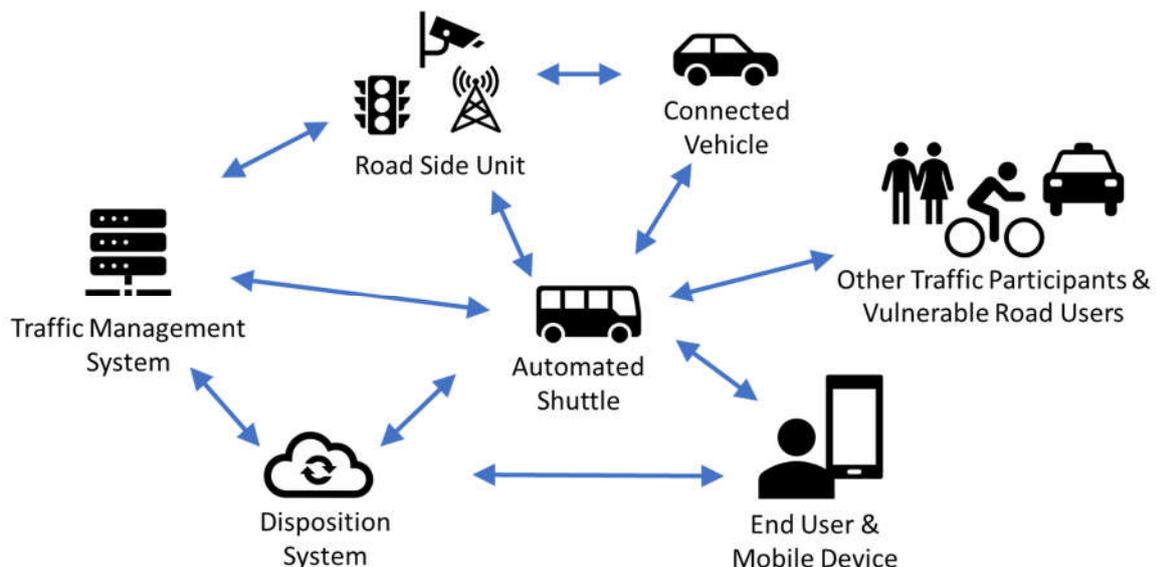
Im Folgenden werden die Begriffe Kooperation, Information und Kommunikation, wie sie im Kontext des ViVre-Mobilitätsdienstes verwendet werden, definiert. Grundlegend ist festzuhalten, dass jede Form der Kooperation, Information und Kommunikation zwischen verschiedenen zu definierenden Akteuren im Sinne einer Interaktion stattfinden. Interaktion kann als „das mehr oder weniger aufeinander abgestimmte Verhalten zweier oder mehrerer [Akteure] angesehen [werden], wobei das Agieren jedes einzelnen [Akteurs] eine zu berücksichtigende Voraussetzung für das Agieren der anderen darstellt“. (Risser et al. 1991). Interaktion und Kommunikation fallen dann zusammen, wenn die Interaktionspartner anwesend sind, also zugleich auch Kommunikationspartner sein können. Im Sinne eines Verkehrssystems bedeutet dies, dass die Kommunikation im Verkehr einen Prozess darstellt, der die simultane Anwesenheit und/oder Erreichbarkeit der Partner voraussetzt, wobei im letzteren Fall V2X die Möglichkeiten zur Kommunikation (insbesondere nichtmenschlicher Akteure) erweitert, ohne dass zwingend eine räumlich-zeitliche Nähe gegeben sein muss. Während des Kommunikationsprozesses werden Informationen in Form von Nachrichten zwischen den Akteuren ausgetauscht. Dazu gehört ebenfalls die Wahrnehmung der Verkehrsumgebung und daraus abgeleitetes Verhalten (Hölzel, 2008). Kommunikation ist in zwei Kategorien unterteilbar: implizite und explizite Kommunikation. Implizite Kommunikation findet statt, wenn das Verhalten eines Verkehrsteilnehmers gleichzeitig als Signal an einen anderen Verkehrsteilnehmer oder als Aufforderung an diesen interpretiert werden kann (Fahrmanöver). Explizite Kommunikation umfasst das Verhalten eines Verkehrsteilnehmers, welches als direktes Signal oder Aufforderung an einen anderen Verkehrsteilnehmer interpretiert werden kann (Blinker setzen) (Markkula et al., 2020). Falls nicht anders beschrieben, ist hier unter Kommunikation die explizite Kommunikation zu verstehen.

Während Kommunikation das gegenseitige Verständnis der Akteure zum Ziel hat, zielt Kooperation zwischen Akteuren darauf ab ein spezifisches Ziel zu erreichen (Clark, 1996; Hoc et al., 2000). Kooperation kann als Mechanismus beschrieben werden, bei dem unter Einsatz begrenzter Ressourcen und Nutzung gemeinsamer Infrastruktur eine gemeinsame Aktion zur Erreichung eines (gemeinsamen) Ziels (bspw. unter dem Aspekt der Verkehrssicherheit) durchgeführt wird (Burger et al., 2017; Zimmermann & Bengler, 2013). Zur Kooperation bedarf es mindestens zweier gemeinsam handelnder Akteure, die ihr Handeln wissentlich aufeinander abstimmen (Hoc et al., 2001). Die Abstimmung der Kooperation ist über verschiedene Kommunikationskanäle möglich. Dabei ist V2X-Kommunikation keine Voraussetzung für kooperatives Verhalten. Kooperatives Verhalten ist in gegenwärtigen Verkehrssituationen erkennbar, obwohl V2X heutzutage noch keine weite Verbreitung erfährt (Ulbrich et al., 2015). Sowohl für Interaktion, Kooperation und Kommunikation spielt Information eine entscheidende Rolle. Information kann als Teilmenge von Wissen charakterisiert werden und beschreibt den Teil einer Nachricht, der für den Empfänger neu ist (Gabler Wirtschaftslexikon).

Nachfolgend werden Kooperation, Information und Kommunikation wie folgt behandelt: Kooperation findet immer dann statt, wenn eine Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Akteuren erfolgt, um bestimmte Ziele zu erreichen. Darüber hinaus werden (Verkehrs-) Situationen identifiziert, die über Kooperationspotential verfügen, aber nicht zwingend umgesetzt werden müssen, sondern lediglich zu einer effizienteren Zielerreichung führen können. Dabei können mehr als zwei miteinander interagierende Akteure involviert sein und die Interaktion kann sich über mehrere Sequenzen, Richtungen und sogar Schlüsselszenen (mit verschiedenen Adressaten zu verschiedenen Zeitpunkten) erstrecken. Die Kooperationsziele können in lokale (eine spezielle Aktion betreffend, bspw. Zusteigen des Endnutzers) und globale Ziele (den Gesamtprozess betreffend, bspw. Endnutzer zu seinem Ziel bringen) untergliedert werden. Es ist anzumerken, dass Kooperation dabei nicht dazu dient alle individuellen Ziele der jeweiligen Akteure zu bedienen. Die Kooperationskonzepte in ViVre befassen sich zunächst damit, wo Kooperation auftritt, welche Akteure involviert sind und welche lokalen und globalen Ziele verfolgt werden. Darüber hinaus wird auch immer definiert, in welcher Reihenfolge die Kooperation ausgeführt wird.

Informationsaustausch, auch als elementarer Baustein der Kooperation, findet immer zwischen zwei Akteuren statt. Dabei kann zwischen der Art und dem Inhalt der Information unterschieden werden. Zentrale Fragestellung für die Informationskonzepte in ViVre ist, welche Informationen von den involvierten Akteuren benötigt werden, um bestimmungsgemäß agieren und gegebenenfalls kooperieren zu können. Auch ist die Reihenfolge des Informationsaustausches wichtig. Darüber hinaus kann Informationsfluss, also das Weiterreichen von Information über mehrere Etappen in die gleiche Richtung als Realisierung von Kommunikation zwischen den Akteuren angesehen werden.

In ViVre ist zentral, welche Kommunikationskanäle genutzt werden, um den Informationsfluss entsprechender Datentypen zu realisieren. Zur Visualisierung der ViVre Informationsflüsse dient das nachstehende Kooperationsnetzwerk (siehe Abbildung 6).



**Abbildung 6: Kooperationsnetzwerk**

Zentraler Punkt stellt in ViVre das automatisierte Shuttle dar, welches mit allen weiteren Akteuren über verschiedene Kanäle verbunden ist. Darüber hinaus stehen die weiteren Akteure untereinander ebenfalls in Verbindung, mit Ausnahme der verletzlichen Verkehrsteilnehmer und andere (nicht

vernetzte) Verkehrsteilnehmer. Dieses Kooperationsnetzwerk konnte in ViVre alle Anwendungen und Use-Cases darstellen, ist aber nicht als finales/vollständiges Netzwerk zu verstehen. Weitere Use-Cases und technische Weiterentwicklungen können zu einer anderen Form des Netzwerkes führen.

Für das ViVre-Mobilitätssystem ist die Erarbeitung der Kooperations-, Informations- und Kommunikationskonzepte eine zentrale Aufgabenstellung. Im Folgenden werden die Anforderungen Nutzender skizziert. Die Anforderungen der Fahrzeugautomation, des Dispositionssystems und der Verkehrsinfrastruktur wurden in den jeweiligen Kapiteln bereits behandelt.

Im Sinne einer hohen Gebrauchstauglichkeit und Akzeptanz des ViVre on-demand Mobilitätsdienstes sind Konzepte dazu aus nutzerzentrierter Perspektive mit entsprechenden Methoden zu gestalten. Für die Konzeption der Information, Kommunikation und Kooperation zwischen Nutzenden und System sollten relevante Szenarien und Schlüsselszenen sehr stark an einer realitätsnahen User-Journey orientiert sein. Insbesondere für die Informationsdarbietung bedeutet dies, dass Nutzergruppen mit ihren Bedürfnissen (in Bezug auf Sicherheit, Verständlichkeit, Komfort, Akzeptanz, Teilhabe etc.) in das Zentrum der Konzeptentwicklung zu stellen sind. Zentral ist dabei eine möglichst intuitive Interaktion der Endnutzenden mit dem System gewährleisten zu können. Es sollte eine App für mobile Endgeräte (Smartphones) mit entsprechendem Front- & Backend bereitgestellt werden, welche Fahrtenbuchungen verarbeitet/verwaltet und die relevanten Informationen des Mobilitätsdienstes den Nutzenden zugänglich macht. Hierbei muss die Vorteilhaftigkeit von spezifischen, für den Kontext zielgerichtete Mensch-Maschine-Interaktionsschnittstellen (human-machine interface; HMI) herausgestellt werden. Nutzerzentrierte HMI Konzepte für automatisierte Fahrzeuge, wie beispielsweise internale- (iHMI), externale (eHMI) und dynamische (dHMI) Interaktionsschnittstellen, sowie HMI Konzepte für mobile Endgeräte zur Interaktion mit virtuellen Haltestellen und vernetzten Verkehrsteilnehmern, haben sich in Nutzerstudien als sehr unterstützend für kooperatives Verhalten erwiesen (Hub et al., 2020; Kettwich et al., 2019; Wilbrink et al., 2021, Lau et al., 2021; Hub et al. 2022; Hub et al. 2022). Darüber hinaus erhöhen entsprechende Mensch-Maschine-Schnittstellen die Nutzerakzeptanz neuartiger Mobilitätslösungen und tragen zur Sicherheit und effizientem Verhalten im Straßenraum bei (Cohen & Human, 2019). Für das ViVre-Gesamtsystem ist die Nutzung von nutzerzentrierten HMI-Konzepten als unverzichtbar anzusehen. Es ist anzumerken, dass der Funktionsumfang der ViVre-Lösungen für Nutzende mit der Barrierefreiheit (als State-of-the-Art Technologien) für jeden Anwendungsfall abgewogen werden müssen. Diese Tatsache unterstreicht noch einmal die Relevanz der nutzerzentrierten Entwicklungsmethoden.

### **Architekturkonzepte für (teil-)virtualisierte Verkehrsinfrastruktur**

Im Rahmen des Arbeitspakets „Architekturkonzepte für (teil-)virtualisierte Verkehrsinfrastruktur“ hat das Projektkonsortium die im Rahmen des Projekts „Digitaler Knoten 4.0“ entwickelte Referenzarchitektur als „Blaupause für die Digitalisierung innerstädtischer Verkehrsknotenpunkte“ um geeignete Konzepte zur Integration (teil-)virtualisierter Verkehrsinfrastruktur-Elemente erweitert. Zu Beginn der Arbeiten wurden hierzu zunächst Architekturansforderungen abgeleitet und erforderliche Anpassungen identifiziert. Die erarbeiteten Architekturkonzepte umfassen u.a. die Kommunikation zwischen Verkehrsinfrastruktur-Elementen. Abschließend wurden Konzepte für die Migration und Integration (teil-)virtualisierter Komponenten in bestehende Systeme erstellt.

Die Vorstellung der erarbeiteten Architekturkonzepte und der übergeordneten ViVre-Referenzarchitektur erfolgt entlang der beiden Anwendungsfälle „Virtuelle Haltestelle“ und „Virtueller Fußgängerüberweg“:

Ein **virtueller Fußgängerüberweg** erlaubt es einem Fußgänger, eine Straße sicher zu überqueren, falls kein konventioneller Fußgängerüberweg vorhanden ist. Der Fußgänger kann einen virtuellen Fußgängerüberweg über ein mobiles Endgerät, wie beispielsweise einem Smartphone, in der direkten Nähe seines Standortes beantragen. Nachdem der Überweg bei einem Dispositionssystem gebucht und von dem Verkehrsmanagementsystem bestätigt wurde, werden alle automatisierten Fahrzeuge, die sich der Position des virtuellen Fußgängerüberwegs nähern, über dessen Existenz informiert. Daraufhin werden diese Fahrzeuge den für den Fußgänger reservierten Korridor auf der Straße freihalten, indem sie davor anhalten. Nach dem sicheren Überqueren der Straße wird der virtuelle Fußgängerüberweg automatisch aufgelöst und die Fahrzeuge setzen ihre Fahrt fort.

Bei dem Anwendungsfall der **virtuellen Haltestelle** geht es um ein autonomes Fahrzeug (Shuttle), welches von einem Nutzer via Smartphone angefordert werden kann. Damit das Shuttle den Nutzer sicher aufnehmen kann und an seinem Ziel absetzen kann, sind Haltestellen für das Shuttle notwendig. Mögliche Positionen einer solchen virtuellen Haltestelle können freie Parkbuchten, zur Ankunftszeit ungenutzte Bushaltestellen oder der rechte Fahrstreifen einer mehrspurigen Straße sein. Das Shuttle fordert dazu ein Dispositionssystem auf, eine virtuelle Haltestelle am Zielort des Shuttles einzurichten. Nachdem die Position der Haltestelle von dem Verkehrsmanagementsystem bestätigt wurde, werden automatisierte Fahrzeuge in der Nähe der Haltestelle darüber informiert, dass der entsprechende Bereich für das ankommende Shuttle reserviert ist.

#### *Akteure und Ableitung der Teilsysteme*

Das **Verkehrsmanagementsystem (TMS)** steuert den Verkehrsfluss und die Verkehrsinfrastruktur in der Umgebung und hat genaue Informationen über die aktuellen Verkehrsverhältnisse. Außerdem ist es der Repräsentant der Behörden und als einziger der in ViVre beteiligten Akteure ermächtigt, Eingriffe in den Straßenverkehr und somit die Einrichtung (und Auflösung) von virtuellen Haltestellen, virtuellen Fußgängerüberwegen oder virtuellen Verkehrszeichen durchzuführen. Je nach Kontext führt das Verkehrsmanagementsystem unterschiedliche Kommunikationen und Interaktionen mit den jeweils beteiligten Akteuren durch.

Im Kontext der virtuellen Haltestelle kann das Verkehrsmanagementsystem (je nach Implementierung) daran beteiligt sein, zusammen mit dem Dispositionssystem eine Kandidatenliste möglicher virtueller Haltestellen und passender Zeiträume zu verhandeln. Es nimmt später Anfragen des Dispositionssystems zur Einrichtung von virtuellen Haltestellen entgegen und beantwortet diese positiv, wenn die Verkehrsverhältnisse es zulassen. Wenn der Einrichtungszeitpunkt der virtuellen Haltestellen sich annähert, informiert das Verkehrsmanagementsystem sowohl die betroffene lokale Verkehrsinfrastruktur (falls vorhanden) als auch vernetzte Verkehrsteilnehmer (insbes. Fahrzeuge) in der Nähe der virtuellen Haltestelle. Auch während des Bestehens der virtuellen Haltestelle werden neu in der Nähe des Haltepunktes eintreffende vernetzte Verkehrsteilnehmer (insbes. Fahrzeuge) informiert. Wenn vom Dispositionssystem die Nachricht eintrifft, dass eine virtuelle Haltestelle nicht mehr benötigt wird, dann wird diese aufgelöst und wiederum lokale Verkehrsinfrastruktur (falls vorhanden) und vernetzte Verkehrsteilnehmer (Fahrzeuge) in Kenntnis gesetzt.

Im Kontext des virtuellen Fußgängerüberwegs kommuniziert das Verkehrsmanagementsystem direkt über ein Endgerät mit dem Endnutzer. Zunächst beantragt dieser einen virtuellen Fußgängerüberweg. In diesem Fall ermittelt das Verkehrsmanagementsystem die vernetzten Fahrzeuge, die sich in der Nähe des geplanten virtuellen Fußgängerüberwegs befinden und sich diesem annähern. Diese Fahrzeuge (und evtl. vorhandene lokale Verkehrsinfrastruktur) werden über den geplanten virtuellen Fußgängerüberweg informiert. Nur wenn alle informierten Fahrzeuge den Eingang der Information rechtzeitig bestätigt haben, dann wird der virtuelle Fußgängerüberweg dem Endnutzer zur Überquerung freigegeben. Auch während des Bestehens des Fußgängerüberwegs werden neu eintreffende vernetzte Fahrzeuge über dessen Existenz informiert. Nachdem der Endnutzer die vollendete Überquerung des virtuellen Fußgängerüberwegs gemeldet hat, löst das Verkehrsmanagementsystem diesen auf und setzt betroffene Verkehrsinfrastruktur und vernetzte Fahrzeuge in Kenntnis.

Das **Dispositionssystem** (DS) verwaltet eine Flotte von Shuttle-Fahrzeugen. Es nimmt von Endnutzern (über Endgeräte übermittelte) Transportanfragen entgegen und weist ihnen passenden Shuttles zu. Dazu stellt es den Endnutzern ein Buchungssystem zur Verfügung. Eine Transportanfrage besteht hierbei aus einem Transportwunsch für eine bestimmte Menge an Personen (evtl. mit zusätzlichen Bedürfnissen und Gepäck) von einem Abholbereich zu einem Ankunftsbereich, ergänzt mit entweder einem ungefähren Abhol- oder einem ungefähren Ankunftszeitpunkt. Das Dispositionssystem ermittelt, ob der Wunsch mit den zur Verfügung stehenden Shuttles und den möglichen (evtl. bereits mit dem Verkehrsmanagementsystem abgestimmten) Haltestellen erfüllt werden kann und stellt dem Endnutzer über das Endgerät ein oder mehrere Reisekandidaten zur Auswahl. Nach der Auswahl des Endnutzers beantragt das Dispositionssystem beim Verkehrsmanagementsystem die Einrichtung von virtuellen Abfahrt- und Ankunftshaltestellen für geeignete Zeiträume. Wenn das Verkehrsmanagementsystem die Einrichtung bestätigt, informiert das Dispositionssystem das Shuttle und den Endnutzer. Wenn der Reisezeitpunkt sich nähert, unterstützt das Dispositionssystem sowohl Shuttle als auch Endnutzer und informiert sie gegenseitig über etwaige Verspätungen. Wenn das Shuttle einen Haltepunkt verlassen hat, sendet das Dispositionssystem an das Verkehrsmanagementsystem die Information, dass der Haltepunkt nicht mehr benötigt wird und aufgelöst werden kann. Optional bietet das Buchungssystem des Dispositionssystems nach dem Abschluss der Reise die Möglichkeit zu Feedback und Bewertung.

Die **Verkehrsinfrastruktur** umfasst alle Formen von Verkehrsinfrastruktur, insbesondere die Anlagen an Knotenpunkten inklusive Lichtsignalanlagen.

Ein **Vulnerable Road User** (VRU) ist ein verletzlicher Teilnehmer im Straßenverkehr, z.B. ein Fußgänger oder ein Radfahrer. Der Vulnerable Road User agiert selbständig und interagiert mit anderen Verkehrsteilnehmern.

Der **Endnutzer** ist ein Fußgänger, der über ein geeignetes Endgerät verfügt und die durch das ViVre-Gesamtsystem bereitgestellten Dienste nutzen möchte.

Im Kontext des Anwendungsfalls „Virtuelle Haltestelle“ benutzt der Endnutzer das Endgerät, um über die Langstreckenkommunikation mit dem Buchungssystem des Dispositionssystems zu kommunizieren. Der Endnutzer fordert eine Transportgelegenheit an und bekommt eine Anzahl an Reisekandidaten (mit Abhol- und Zielhaltestellen und -zeitpunkten) präsentiert, aus denen er eine auswählt und die (im Sunny-Day-Szenario) vom Dispositionssystem bestätigt wird. Zum

Reisezeitpunkt begibt sich der Endnutzer zum Abholpunkt. Er erreicht diesen rechtzeitig und besteigt das ebenfalls rechtzeitig eintreffende Shuttle. Anschließend lässt sich der Endnutzer vom Shuttle zum Absetzpunkt transportieren, verlässt es und schließt damit die Reise ab. Varianten dieses Vorgangs umfassen u.a. eine Verspätung von Endnutzer oder Shuttle.

Im Kontext der virtuellen Fußgängerüberwege benutzt der Endnutzer das Endgerät, um über die Langstreckenkommunikation mit dem Verkehrsmanagementsystem zu kommunizieren und einen virtuellen Fußgängerüberweg anzufordern. Nach Bestätigung begibt sich der Endnutzer zum Ort des Überwegs und wartet auf die Freigabe zur Nutzung. Nachdem das TMS diese gegeben hat, überquert der Endnutzer die Straße. Die vollzogene Überquerung der Straße meldet er dem Verkehrsmanagementsystem entweder aktiv, oder das Endgerät übernimmt dies automatisch.

Das **Endgerät** ist z.B. ein Smartphone, mit dem ein Endnutzer ausgestattet ist, und den Nutzer bei der Kommunikation mit dem Dispositions- und dem Verkehrsmanagementsystem unterstützt.

Im Kontext des Anwendungsfalls „Virtuelle Haltestelle“ findet ein bidirektionaler Informationsaustausch zwischen dem Endgerät und dem Dispositionssystem statt. Zunächst ermöglicht es dem Nutzer die Aushandlung und Buchung eines Personentransports, inklusive Ort und Zeit für virtuelle Abhol- und Zielhaltestellen. Kurz vor der Reise unterstützt es den Nutzer beim Weg zum Abholpunkt und hält ihn über evtl. auftretende Änderungen und Anpassungen auf dem Laufenden. Während der Reise stellt das Endgerät dem Endnutzer Reiseinformationen zur Verfügung. Außerdem ermöglicht es dem Endnutzer, Feedback zur Reise zu geben und eine Bewertung der virtuellen Haltestellen abzugeben. Im Kontext des virtuellen Fußgängerüberwegs findet ein bidirektionaler Informationsaustausch zwischen Endgerät und Verkehrsmanagementsystem statt. Das Endgerät stellt dem Nutzer eine Möglichkeit zur Verfügung, mit dem Verkehrsmanagementsystem den Ort und die Zeit für einen virtuellen Fußgängerüberweg zu vereinbaren. Es unterstützt den Endnutzer beim Weg zum vereinbarten Ort des geplanten Überwegs und gibt nach entsprechender Nachricht den Überweg zur Überquerung frei. Schließlich meldet das Endgerät dem Verkehrsmanagementsystem die vollzogene Überquerung.

Ein **automatisiertes Fahrzeug (AV)** bewegt sich automatisiert, hochautomatisiert oder autonom im Straßenverkehr. Es verfügt über Fähigkeit zur Kurzstreckenkommunikation „Short Range-Kommunikation“ mit lokaler Verkehrsinfrastruktur und Langstreckenkommunikation „Long Range-Kommunikation“ mit dem Verkehrsmanagementsystem. In allen Kontexten führt das automatisierte Fahrzeug autonome Fahrfunktionen aus und interagiert mit anderen Verkehrsteilnehmern und Verkehrsinfrastruktur. Zusätzlich kommuniziert das automatisierte Fahrzeug mit dem Verkehrsmanagementsystem und passt sein Verhalten den empfangenen Informationen an.

Im Kontext der virtuellen Haltestelle bedeutet das, dass im entsprechenden Zeitrahmen der Ort der virtuellen Haltestelle gemieden wird. Im Kontext des virtuellen Fußgängerüberwegs wird zunächst der Eingang der Information bestätigt, bevor das Fahrzeug, wenn es sich im entsprechenden Zeitrahmen dem Ort der Haltestelle nähert, vor diesem zum Stehen kommt.

Ein **Shuttle** ist ein spezialisiertes automatisiertes Fahrzeug, das von einem Dispositionssystem verwaltet und zum Personentransport eingesetzt wird. Zusätzlich zu den Kommunikationsmöglichkeiten eines normalen automatisierte Fahrzeugs verfügt ein Shuttle über eine Kommunikationsmöglichkeit zum Dispositionssystem. Möglicherweise hat es besondere Human-Machine-Interfaces (HMIs) zur Kommunikation mit dem zu transportierenden Endnutzer.

Das Shuttle verfügt über ein Buchungssystem, das mit dem Dispositionssystem die Buchung von Transportaufträgen aushandelt. Ein *Routing- und Travel Management-System* verwaltet die Ausführung der einzelnen (sich evtl. überlappenden) Aufträge und steuert die Route, der das Shuttle bei der Anfahrt von (virtuellen) Haltestellen folgt. Der Besuch an einer einzelnen virtuellen Haltestelle wird von einem *Virtual Stop Situation-Management* gesteuert. Insbesondere sendet das Routing- und Travel Management-System gegebenenfalls Statusinformationen an das Dispositionssystem und stützt sich dabei auf Informationen der anderen Komponenten ab. Statusinformationen beinhalten explizit Information über Verspätungen, Annäherung an und Abfahrt von virtuellen Haltestellen sowie dem Ein- und Ausstieg von Passagieren.

#### *Vorstellung des Systemkontexts*

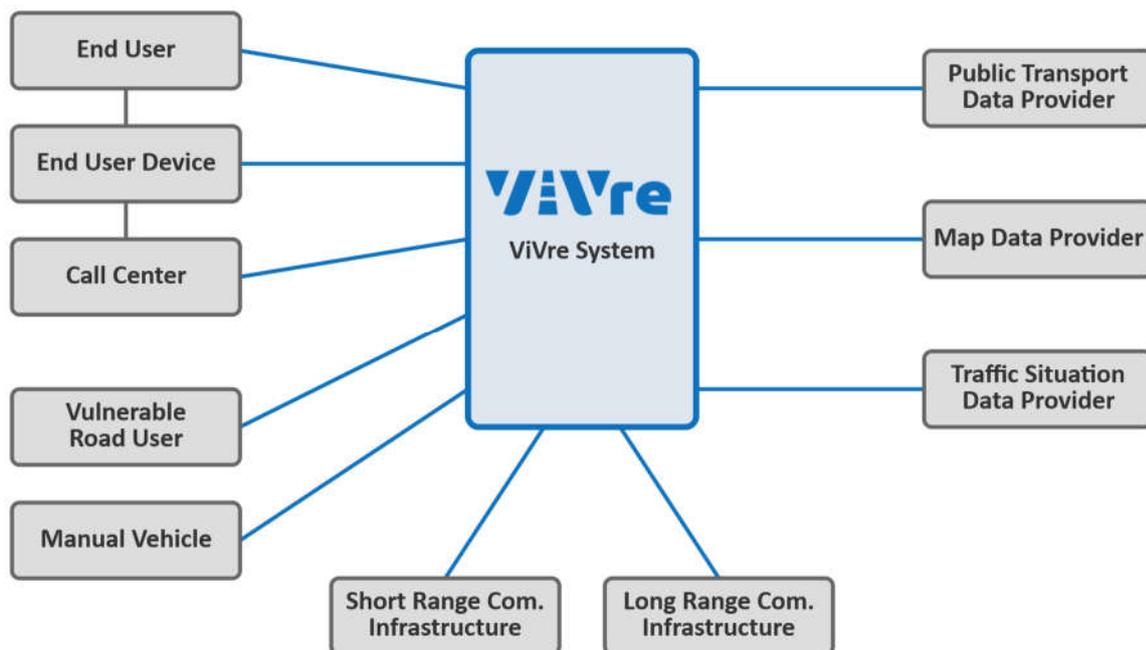


Abbildung 7: Systemkontext der ViVre-Referenzarchitektur

In Abbildung 7 ist der Systemkontext der ViVre-Referenzarchitektur dargestellt.

Es gibt verschiedene menschliche Akteure, die mit dem ViVre-System interagieren. Diese unterteilen sich in aktive und passive Akteure. Die aktiven Akteure sind Endnutzer und Call Center. Der Endnutzer interagiert mit dem ViVre-System über das Endgerät, um beispielsweise ein Shuttle zu buchen. Supportanfragen der Endnutzer werden in einem Call Center bearbeitet. Passive Akteure sind Vulnerable Road User und Manual Vehicles. Sie führen eine Koexistenz mit dem ViVre System. Akteure des Systems müssen ihre Anwesenheit zur Kenntnis nehmen und auf sie reagieren können, sodass es zu keinen Unfällen kommen kann.

Daten-Provider stellen Daten und Informationen bereit, die durch das ViVre-System verwendet werden können. Zu den Daten gehören beispielsweise Informationen über den ÖPNV, Karteninformation (z.B. Open Street Map) und Informationen über den Verkehrsfluss.

Bei der Kommunikationsinfrastruktur handelt es sich um die physische Infrastruktur, die von der ViVre-Kommunikation (logisch) genutzt wird. Hierbei handelt es sich um die Infrastruktur von Telekommunikations-Providern.

### Vorstellung der Systemarchitektur

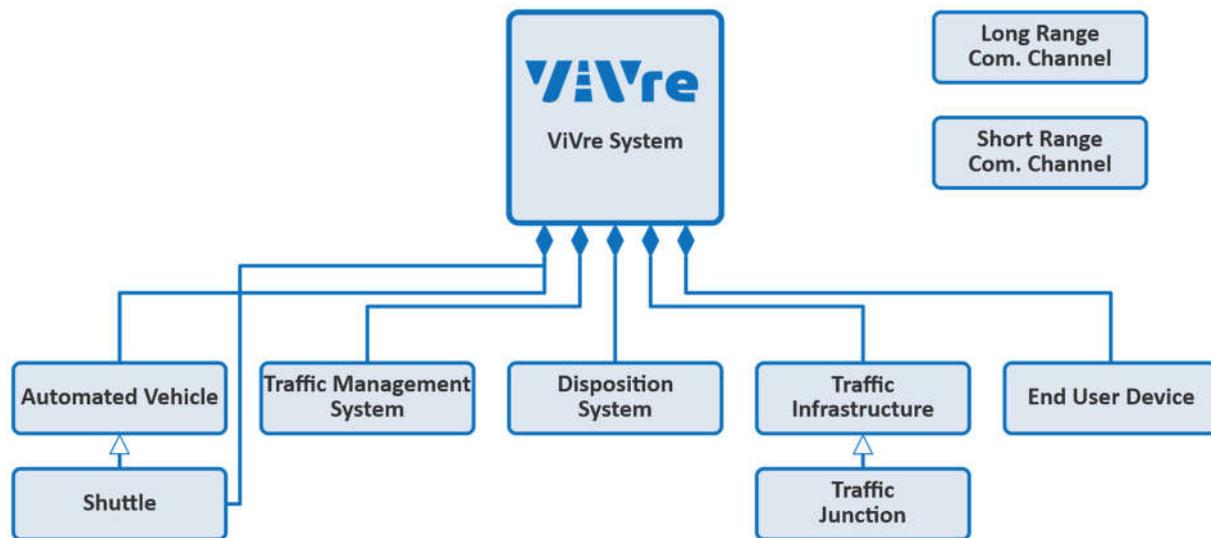


Abbildung 8: Teilsysteme des ViVre-Systems

In Abbildung 8 werden die Teilsysteme des ViVre-Systems gezeigt.

Automatisierte Fahrzeuge werden als Teil des ViVre-Systems betrachtet. Sie kommunizieren mit anderen Teilsystemen und werden vom Verkehrsmanagementsystem und der Verkehrsinfrastruktur mit Informationen versorgt. Shuttles werden genauso wie automatisierte Fahrzeuge behandelt, stehen aber zusätzlich mit einem Dispositionssystem in Kontakt und werden von diesem gemanagt.

Das Verkehrsmanagementsystem, welches beispielsweise von den Kommunen betrieben wird, erlaubt es Eingriffe in den Verkehr vorzunehmen. Dies ist beispielsweise notwendig um eine virtuelle Haltestelle auf öffentlichem Raum einzurichten oder temporär eine Straße zur Überquerung eines Fußgängers zu sperren.

Ein Dispositionssystem oder ggf. mehrere Dispositionssysteme dienen dem Management der automatisierten Shuttles sowie der Bereitstellung von Servicedienstleistungen für die Benutzer. Beispiele solcher Dienstleistungen können neben einem Shuttle Service auch die Möglichkeit zur temporären Errichtung eines virtuellen Fußgängerüberwegs sein.

Verkehrsinfrastrukturelemente können einfache Verkehrsschilder oder Road-Side Units sein. Solche Verkehrsinfrastrukturelemente kommunizieren teilweise direkt mit den automatisierten Fahrzeugen oder bilden Vermittlungsstellen für eine indirekte Kommunikation zwischen Fahrzeugen und dem Verkehrsmanagementsystem. Des Weiteren sind auch größere Anlagen Teil der Verkehrsinfrastruktur, wie zum Beispiel Verkehrskreuzungen, wie sie im Vorgängerprojekt „Digitaler Knoten 4.0“ betrachtet wurden.

Das Endgerät dient zur Ausführung von Applikationen (Apps), die es dem Benutzer einer Service-Dienstleistung erlauben, mit dem ViVre-Teilsystem „Dispositionssystem“ zu interagieren, beispielsweise um ein Shuttle oder einen virtuellen Fußgängerüberweg anzufordern.

Die Kommunikationskanäle, die von Dienstleistern bereitgestellt werden, werden zur Kommunikation der Teilsysteme verwendet (siehe Abbildung 9). Diese Teilsysteme werden zwar von dem ViVre-Gesamtsystem genutzt, sind aber nicht zwangsläufig Teil des Gesamtsystems.

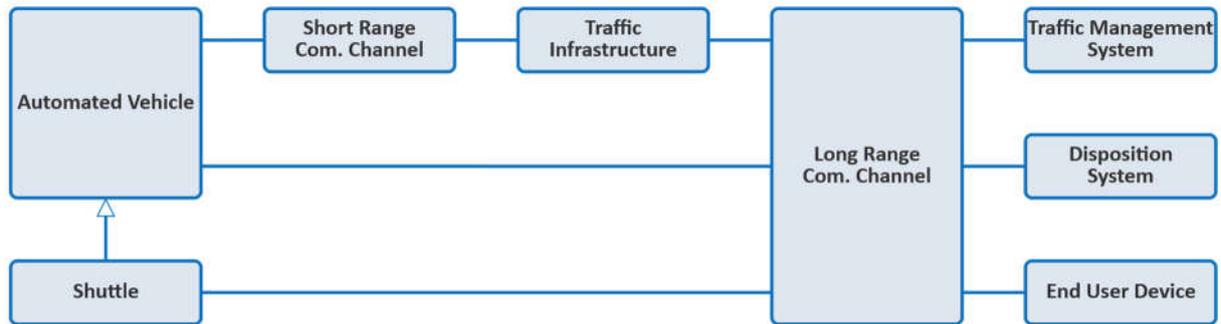


Abbildung 9: Schnittstellen der ViVre-Teilsysteme

Automatisierte Fahrzeuge können über die Kurzstreckenkommunikation („Short Range Communication Channel“) mit Verkehrsinfrastrukturelementen wie z.B. einer Road-Side-Unit kommunizieren, welche die Informationen optional über die Langstreckenkommunikation („Long Range Communication Channel“) an andere ViVre-Teilsysteme weiterleitet. Zusätzlich können die Fahrzeuge auch direkt die Langstreckenkommunikation nutzen. Shuttles nutzen die gleichen physischen Kommunikationskanäle wie automatisierte Fahrzeuge, können zusätzlich aber mit dem Dispositionssystem kommunizieren. Das Dispositionssystem, Verkehrsmanagementsystem und Endgeräte von Nutzern tauschen ihre Informationen über die Langstreckenkommunikation aus.

#### Gap-Analyse zu den Ergebnissen aus „Digitaler Knoten 4.0“

Ebenso wie im Vorgängerprojekt „Digitaler Knoten 4.0“ (DK4.0) müssen sich auch in ViVre automatisierte Fahrzeuge autonom im Straßenverkehr bewegen. Die entsprechende Grundfunktionalität ist bereits in der DK4.0-Referenzarchitektur enthalten und wurde für ViVre übernommen und erweitert. Wie in DK4.0 müssen auch in ViVre automatisierte Fahrzeuge miteinander und mit Verkehrsinfrastrukturelementen kommunizieren. Auch diese Elemente der DK4.0-Referenzarchitektur wurden ViVre übernommen und erweitert. Anders als in DK4.0 können aber in ViVre Fahrzeuge auch fernab von kommunikationsfähigen Infrastrukturelementen agieren, und müssen auch in diesen Fällen mit anderen ViVre-Teilsystemen (wie dem Verkehrsmanagementsystem) kommunizieren. Zwar ist das grundsätzliche Fahrverhalten schon durch die DK4.0-Referenzarchitektur abgedeckt, allerdings ist hier die Kurzstreckenkommunikation nicht ausreichend. Daher enthält die ViVre-Referenzarchitektur für automatisierte Fahrzeuge auch zusätzlich die Fähigkeit zur Langstreckenkommunikation, z.B. mittels Mobilfunk-Nachrichten.

Anders als in DK4.0 begrenzt sich in ViVre die Teilsystemklasse Verkehrsinfrastruktur nicht nur auf zentrale Steuerungssysteme von Verkehrsknoten. In ViVre umfasst die Systemklasse alle Formen von Verkehrsinfrastrukturelementen (z.B. Verkehrsschilder, Road Side Units, Lichtsignalanlagen, ...), solange diese kommunikationsfähig sind. In diesem Sinne ist die ViVre-Systemklasse eine abstrakte Oberklasse, die sich in konkrete Unterklassen aufteilt. Die der DK4.0-Systemklasse Verkehrsinfrastruktur entsprechende konkrete Unterklasse trägt in ViVre den Namen *Traffic Junction*.

In DK4.0 bezog sich die Teilsystemklasse Kommunikationskanal ausschließlich auf die Kurzstreckenkommunikation, also die direkte Kommunikation zwischen Fahrzeugen und lokaler

Verkehrsinfrastruktur. In ViVre wird auch die Langstreckenkommunikation betrachtet. Deswegen bezeichnet in ViVre die Systemklasse Communication Channel eine abstrakte Oberklasse, die sich in die konkreten Unterklassen *Short Range Communication* und *Long Range Communication* aufteilt.

### Absicherung und Echtzeitbehandlung

Das Arbeitspaket „Absicherung und Echtzeitbehandlung“ (AP5) zielt auf die Entwicklung von Konzepten und Methoden für eine korrekte und echtzeitfähige Realisierung der in ViVre entwickelten Interaktions- und Architekturkonzepte ab. Zunächst wurden hierzu relevante Echtzeit- und Sicherheitsanforderungen erfasst und formalisiert. Durch ihre Verankerung in der systemübergreifenden Aktivitätenmodellierung von Systemen mit (teil-)virtualisierter Verkehrsinfrastruktur lassen sich etwaige Fehlerauswirkungen analysieren und erlauben die Ableitung von zusätzlichen Sicherheitsmechanismen und Rückfallebenen. Dieser Prozess wird in den folgenden Abschnitten detailliert dargestellt. Er stellt eine umfassende Erweiterung bestehender Methoden zur Echtzeitbehandlung von gemischt-physisch-virtuellen Systemen von Systemen dar und kann in die vorhandenen Interaktionskonzepte und Referenzarchitektur integriert werden.

Im Rahmen von ViVre wurde ein systematisches Verfahren entwickelt, um den Bedarf an Rückfallebenen für bestimmte Aktivitäten auf einer formalen Basis zu ermitteln. Zunächst wird ein allgemeiner Prozess vorgestellt, der in der Ermittlung kritischer Zeitdauergrößen und die anschließende Entwicklung von Rückfallebenen mündet. Jeder Schritt wird im Detail erklärt. Als Leitbeispiel für dieses Verfahren dient der Anwendungsfall eines virtuellen Fußgängerüberwegs.

#### Anwendungsfall „Virtueller Fußgängerüberweg“

Als Anwendungsfall für unsere Methode verwenden wir den virtuellen Fußgängerüberweg (VPC<sup>1</sup>), der in Kapitel „Use Cases, Szenarien, Anforderungsdefinition“ beschrieben wurde.

Ein virtueller Fußgängerüberweg ist eine Möglichkeit für einen Fußgänger, eine Straße zu überqueren, wenn kein herkömmlicher Übergang zur Verfügung steht. Der Fußgänger kann mit einem Endgerät, z. B. einem Smartphone, einen virtuellen Übergang anfordern. Sobald der virtuelle Fußgängerüberweg gebucht wurde, müssen alle automatisierten Fahrzeuge in der Nähe darüber informiert werden, dass vorübergehend ein Korridor zur Straßenüberquerung für einen Fußgänger reserviert ist. Solange dieser temporäre Korridor existiert, darf kein Fahrzeug diesen reservierten Teil der Straße passieren und muss warten, bis der virtuelle Fußgängerüberweg abgebaut wird.

Im Folgenden wird die Vorbereitung und Aktivierung eines virtuellen Fußgängerüberwegs – einschließlich der Kommunikation mit der Verkehrsinfrastruktur und den beteiligten Verkehrsteilnehmern – als Beispiel für die Anwendung der entwickelten Methoden verwendet.

#### Integration in den Systementwicklungsprozess

Dieser Abschnitt beschreibt einen Arbeitsablauf zur Behandlung sicherheitskritischer Echtzeitaspekte im modellbasierten Entwurf von Systemen von Systemen. Der Workflow ergänzt die klassische Behandlung von sicherheitsrelevanten Aspekten mit der Gefahren- und Risikoanalyse (HARA<sup>2</sup>), bei der häufig Echtzeitaspekte nicht berücksichtigt werden. Der Workflow kann in verschiedene

---

<sup>1</sup> Die Abkürzung VPC bezieht sich auf die englische Übersetzung „virtual pedestrian crossing“.

<sup>2</sup> Die Abkürzung HARA steht für die englischen Bezeichnung „hazard analysis and risk assessment“.

Entwicklungsmodelle, wie beispielsweise das V-Modell oder den „Development & Operations“ (DevOps)-Zyklus, integriert werden.

Grundlage des Ansatzes ist ein initiales formales Modell der Realzeiteigenschaften (RT<sup>3</sup>-Eigenschaften) des betrachteten Systemverbundes (SoSuC<sup>4</sup>), in dem erste Sicherheitsanforderungen verankert sind. Innerhalb von ViVre werden sogenannte „Aktivitätsnetze“ verwendet, um die dynamische Struktur der Aufgaben zu beschreiben, die das SoSuC ausführen kann. In Aktivitätsnetzen (AN) stellt jede Aktivität eine Aufgabe dar, an der ein oder mehrere Subsysteme beteiligt sind. Aktivitäten können in Teilaufgaben untergliedert werden. Aktivitäten und ihre Unteraktivitäten bilden somit Aktivitätsbäume. Jede Aktivität ist mit einer Aktivitäts-RT-Spezifikation verbunden, die die RT-Eigenschaften der Aktivität und die Beziehung dieser Eigenschaften zu den RT-Eigenschaften der Unteraktivitäten formal beschreibt. Typische Eigenschaften sind Einschränkungen der Aktivitätsreihenfolge und -dauer, einschließlich oberer und unterer Grenzen für die Aktivitätsdauer. Wenn sicherheitsrelevante RT-Anforderungen (bei denen es sich häufig um Beschränkungen der Dauer und der Dauergrenzen selbst handelt) formalisiert und im Aktivitätsnetz verankert sind, können die RT-Spezifikationen der Aktivität genutzt werden, um weitere Abhängigkeiten für die RT-Anforderungen oder sogar konkrete Werte für RT-Anforderungsparameter. Typischerweise sind zu Beginn des Entwicklungsprozesses nur wenige Details über das SoSuC und seine RT-Eigenschaften bekannt, so dass die auferlegten Beschränkungen nur grob erfasst wurden und die RT-Dauer (Grenzen) abstrakt bleibt. Sobald mehr Design- und Architekturentscheidungen konkretisiert sind (und in die AN und die RT-Anforderungen einfließen), verbessert sich das Wissen, und die RT-Eigenschaften werden feinkörniger und präziser.

Der hier beschriebene Ansatz macht sich diese Prozesse systematisch zunutze. Nachdem ein erstes Aktivitätsnetz und ein erster Satz sicherheitsrelevanter Anforderungen (RT) erstellt wurden (durch einen systematischen Prozess der Gefahren- und Risikoanalyse, von Hand oder automatisiert), werden sie verwendet, um die sicherheitskritischen Szenarien zu identifizieren und ihnen quantitativen Kritikalitätsgrad zuzuordnen. Solange es Szenarien gibt, deren Kritikalität einen zuvor definierten Schwellwert überschreitet, wird jedes dieser Szenarien analysiert und die Kritikalität entweder durch Einführung entsprechender Fehlerbehandlungsmechanismen oder Rückfallebenen reduziert. Diese verändern die Aktivitäten innerhalb des SoSuC und/oder führen neue Sicherheits-RT-Anforderungen ein, so dass das Aktivitätsnetz angepasst werden muss und/oder neue RT-Anforderungen darin verankert werden müssen. Nun werden erneut kritische Szenarien identifiziert. Dieser Zyklus wird so lange wiederholt, bis kein kritisches Szenario mehr übrigbleibt, das den Schwellwert überschreitet.

### *Modellierung der Echtzeiteigenschaften von Systemen mit Aktivitätsnetzen*

In den folgenden Abschnitten stellen wir Aktivitätsnetze und die damit verbundenen Modellierungs- und Formalisierungsprozesse vor. Wir zeigen, wie Echtzeitanforderungen im Aktivitätsnetz verankert werden können und wie dadurch kritische Grenzen der Dauer von Aktivitäten bestimmt und verfeinert werden können.

### **Aktivitätsnetze und Aktivitäts-Echtzeit-Spezifikationen**

Die grundlegendste Voraussetzung für den erfolgreichen Umgang mit Echtzeiteigenschaften von Systemverbänden ist die Fähigkeit, sie auf sinnvolle und prägnante Weise zu erfassen. Hierfür im

---

<sup>3</sup> Die Abkürzung RT steht für den englischen Begriff „real-time“.

<sup>4</sup> Die Abkürzung SoSuC steht für die englische Bezeichnung „system of systems under consideration“.

Rahmen von ViVre Aktivitätsnetze, angereichert mit Aktivitäts-Echtzeitspezifikationen, als Beschreibungsformalismus verwendet. Aktivitätsnetze bestehen aus einem oder mehreren Aktivitätsbäumen. Jede Aktivität beschreibt eine Aufgabe, die von einem oder mehreren Systemen oder Subsystemen ausgeführt wird. Aktivitäten können grob formuliert sein wie "Shuttle S transportiert Person P von Punkt A nach Punkt B" (woran die Systeme „Shuttle S“ und „Person P“ beteiligt sind) oder feingranular, wie beispielsweise „Komponente C empfängt Nachricht M über WiFi“ (woran „Komponente C“ als Einzelakteur beteiligt ist) erfasst werden.

Häufig enthalten Aktivitäten Unteraktivitäten, z. B. kann die Aktivität „Shuttle S transportiert Person P von Punkt A nach Punkt B“ die Unteraktivitäten „Shuttle S holt Person P an Punkt A ab“, „Shuttle S fährt mit Person P an Bord von Punkt A nach Punkt B“ und „Shuttle S setzt Person P an Punkt B ab“ enthalten, die in diesem Fall in aufeinanderfolgender Reihenfolge ausgeführt werden. Auf diese Weise bilden die Aktivitäten und ihre Unteraktivitäten (und die Unteraktivitäten der Unteraktivitäten) einen Aktivitätenbaum, der die dynamische Struktur der jeweiligen Aufgabe beschreibt. Typischerweise sind an den Aktivitäten auf der obersten Ebene mehr Akteure beteiligt, während die Aktivitäten in der Tiefe des Baums weniger Akteure enthalten, da die kollaborative Aufgabe der obersten Ebene auf mehr lokale (Unter-)Aufgaben verteilt wurde. Echtzeiteigenschaften werden den Aktivitäten mit Hilfe von formalen Constraints (Beschränkungen) zugewiesen, die in sogenannten Assume-Guarantee-Contracts (Verträge mit garantiertem Ausgabeverhalten bei zugesichertem Umgebungsverhalten) eingebettet sind. Für jede Aktivität werden die relevanten Contracts in einer Echtzeit-Spezifikation zusammengefasst, die das Echtzeitverhalten der Aktivität einschränkt, oft auf der Grundlage des Echtzeitverhaltens der Sub-Aktivitäten. Es gibt zwei Arten von Echtzeiteigenschaften. Die eine Art von Eigenschaften sind Reihenfolgebeschränkungen (z. B. ergibt die Ausführung der Aktivität „Shuttle S transportiert Person P von Punkt A nach Punkt B“ keinen Sinn, wenn „Person P“ vorher nicht abgeholt wurde, so dass die Aktivität „Shuttle S holt Person P an Punkt A ab“ abgeschlossen sein muss, bevor der Transport eingeleitet wird). Die andere Art von Beschränkungen sind Dauerbeschränkungen, die sich mit der Dauer von Aktivitäten befassen und sich oft auf die Dauer von Unteraktivitäten stützen.

Im Entwicklungsprozess werden die Echtzeitbeschränkungen zunächst mit Hilfe von Echtzeitanforderungen erfasst, die dann in eine formale Darstellung übersetzt und in Contracts eingebettet werden.

Die Modellierungs- und Formalisierungsprozesse werden im Folgenden näher beschrieben. Insgesamt zielt der modulare Ansatz darauf ab, Verfeinerungen in späteren Entwicklungsphasen einfach hinzufügen zu können. Zum Beispiel kann die interne Struktur einer Subaktivität in frühen Entwicklungsphasen oft nicht beschrieben werden, da die Architektur und Implementierungsdetails noch nicht bekannt sind. Sobald mehr Details bekannt sind, kann auch die Struktur der Subaktivitäten konkretisiert werden, um entsprechende Echtzeiteigenschaften einzubeziehen.

### Modellierungsprozess

In diesem Abschnitt wird der Prozess der Modellierung von Echtzeiteigenschaften für eine einzelne Aktivität beschrieben.

Zunächst müssen hierfür die entsprechenden Unteraktivitäten erfasst werden (falls vorhanden). Wenn es Unteraktivitäten gibt, werden deren Echtzeiteigenschaften in zwei Teilschritten in Beziehung zu den Echtzeiteigenschaften der übergeordneten Aktivität gesetzt: Zunächst werden die

Beziehungen zwischen den Unteraktivitäten modelliert, dann die Beziehungen zwischen Unteraktivitäten und übergeordneter Aktivität.

In jedem Fall wird jede einzelne Eigenschaft als Echtzeitanforderung mit Hilfe einer semiformalen Echtzeit-Constraint-Sprache ausgedrückt. Jede Echtzeitanforderung wird mit Hilfe des im Folgenden Abschnitt beschriebenen Formalisierungsprozesses in eine formale Darstellung übersetzt. Diese formale Repräsentation wird dann in einen Assume-Guarantee-Contract eingebettet.

Ein Assume-Guarantee-Contract ist ein Konzept der vertragsbasierten Entwurfsmethodik. In einem Assume-Guarantee-Contract garantiert die zugehörige Entität (klassischerweise eine Systemkomponente, in ViVre wurde das Konzept auf Aktivitäten übertragen) ein bestimmtes Verhalten, wenn bestimmte (von der Umgebung vorgegebene) Annahmen zutreffen. In ViVre gelten die meisten Echtzeitcontracts bedingungslos (d.h. die Annahme ist „wahr“ und die Garantie gilt unter allen Umständen). Dies ändert sich, sobald Alternativen oder Systemmodi involviert sind.

Alle Echtzeitverträge, die mit einer Aktivität verbunden sind, werden in der entsprechenden Aktivitäts-Echtzeitspezifikation gesammelt.

### Formalisierung von Echtzeitanforderungen

Jede Echtzeitanforderung stellt eine Aussage dar, die mit Hilfe einer semiformalen Sprache für Aktivitäts-Echtzeitbeschränkungen ausgedrückt werden kann. Die semiformale Sprache stellt vorformulierte Phrasen zur Beschreibung typischer Beziehungsmuster zwischen Aktivitäten und ihren Dauern bereit. Diese Phrasen lassen sich analog zur Einteilung der durch sie repräsentierten Eigenschaften in Phrasen für die Aktivitätsreihenfolge und Phrasen für die Aktivitätsdauer unterteilen, und eine Anforderung ist entweder eine Aktivitätsreihenfolgeanforderung oder eine Aktivitätsdaueranforderung, je nach Art der verwendeten Phrase.

Schließlich lassen sich die semiformalen Echtzeitanforderungen an die Aktivitäten in eine formale Sprache überführen. Auf die so erzeugten formale Constraints werden nun mathematische Deduktionen und Schlussfolgerungen angewendet. Die in ViVre verwendete formale Sprache für Echtzeit-Constraints ist MTSL mit Ungleichungen. MTSL ist die MULTIC Timing Specification Language<sup>5</sup> und drückt Constraints auf Events (Ereignisse) in einem System von Events aus, einschließlich Constraints auf Eventreihenfolge und den zeitlichen Abstand der Events. Im Rahmen von ViVre wurde MTSL mit Ungleichungen ergänzt, die es ermöglichen, Constraints auf und Beziehungen zwischen Dauern und Dauergrenzen mit einfachen mathematischen Gleichungen oder Ungleichungen auszudrücken, siehe dazu Abbildung 10.

---

<sup>5</sup> Eckard Böde, W. Damm, et al. (2019). *MULTIC-Tooling*. Verband der Automobilindustrie (VDA), Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT). Retrieved from <https://www.vda.de/de/services/Publications/fat-schriftenreihe-316.html>

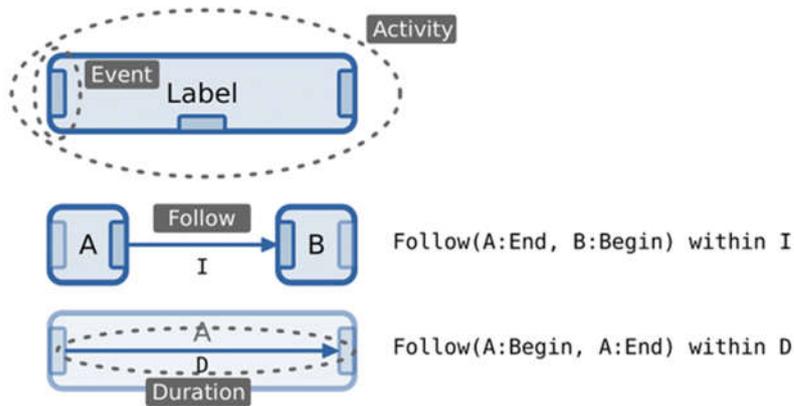


Abbildung 10: Aktivitäten, Reihenfolge- und Dauer-Constraints und MTSL-Formulierung

Der Formalisierungsprozess besteht aus zwei aufeinanderfolgenden Schritten (Abbildung 11): Zunächst wird die semiformale Aktivitäts-Echtzeitanforderung in eine semiformale Event-Echtzeitanforderung übersetzt, die dann in eine formale MTSL-Beschränkung oder eine Ungleichung über die Dauer einer Aktivität übersetzt wird. Event-Echtzeit-Anforderungen werden wiederum in einer semiformalen Sprache ausgedrückt, die vorformulierte Phrasen verwendet, um typische Muster von Ereignisordnungsbeziehungen und Ereignisabständen zu beschreiben. Die RT-Anforderungen an die Aktivitäten sind mit den RT-Anforderungen an die Events durch die Annahme verbunden, dass jede Aktivität mit einem Anfangs- und einem End-Event verbunden ist. Die Dauer einer Aktivität entspricht dem zeitlichen Abstand zwischen Anfangs- und Endevents und wird (wie die oberen und unteren Scharanken für die Dauer) innerhalb der Dauerbeschränkungen mit Hilfe einer symbolischen Variablen dargestellt.

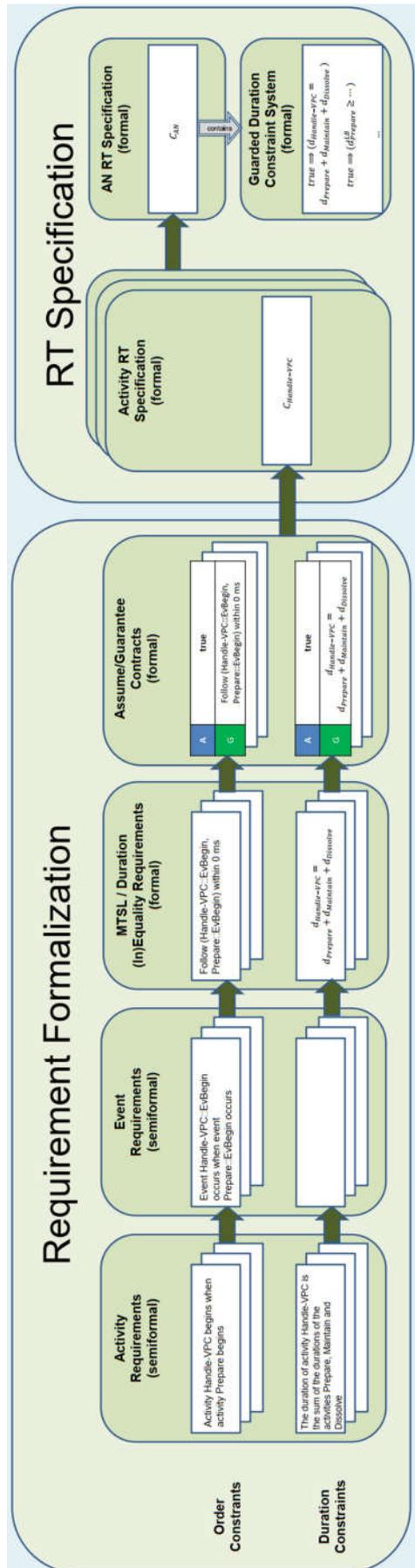


Abbildung 11: Prozess der Formalisierung von Echtzeitanforderungen

### *Verankerung von Echtzeitanforderungen in Aktivitätsnetzen*

Typischerweise beschreibt eine RT-Anforderung ein Zeitlimit, das als zeitlicher Abstand (oder Schranke für den zeitlichen Abstand) zwischen zwei Events ausgedrückt werden kann. Um eine RT-Anforderung in einem Aktivitätsnetz zu verankern, müssen zunächst die entsprechenden Events im Netzwerk ermittelt werden. Oftmals sind diese Events bereits explizit im Netzwerk vorhanden, z.B. als Anfangs- oder End-Event einer Aktivität. Wenn dies nicht der Fall ist, muss ein zusätzliches Event in das Netzwerk eingefügt werden. Ein Event wird eingefügt, indem es innerhalb einer Aktivität platziert wird. Daher müssen die zeitlichen Abstände (und deren Grenzen) zwischen dem neuen Event und den bereits in der Aktivität vorhandenen Events explizit angegeben werden, wodurch neue RT-Anforderungen entstehen. Im zweiten Schritt, nachdem die Events identifiziert wurden, kann die zu verankernde RT-Anforderung als semiformale Zeitdauer-Constraint ausgedrückt und dem üblichen Formalisierungsprozess unterzogen werden, was zu einer formalen Darstellung der fest im Aktivitätsnetzwerk verankerten Anforderung führt. Die sich daraus ergebenden Randbedingungen können entweder getrennt vom Netzwerk gesammelt oder in das Netzwerk eingefügt werden, indem ein Hilfsaktivitäten mit entsprechenden Anfangs- und End-Events definiert werden

### *Identifizierung und Bewertung von kritischen Szenarien*

Um eine angemessene Fehlerbehandlung oder Rückfallebenen für die Abschwächung von Gefahren einzuführen, müssen die Gefahren zunächst ermittelt werden. Wir gehen davon aus, dass der beschriebene Prozess in einen formalen Prozess der Gefahren- und Risikoanalyse integriert ist, in dem das System systematisch analysiert, Gefahren identifiziert und entsprechende Sicherheitsanforderungen hervorgebracht werden. Der Einfachheit halber nehmen wir an, dass diese Sicherheitsanforderungen erste RT-Sicherheitsanforderungen enthalten, die mit dem bereits beschriebenen Prozess im Aktivitätsnetz verankert wurden.

Jede verankerte RT-Sicherheitsanforderung ist mit zwei Events und einem zeitlichen Abstand (Dauer) verbunden. Um die identifizierten Gefährdungen zu mindern, müssen alle RT-Szenarien berücksichtigt werden, die vom früheren Ereignis zum späteren führen. Diese können aus dem Aktivitätsnetz extrahiert werden. Für ViVre werden nur unverzweigte RT-Szenarien verwendet, d.h. jedes RT-Szenario wird durch eine nicht verzweigte Eventkette dargestellt. Die Verwendung von komplexeren RT-Szenarien (die Ausschnitte des Aktivitätsnetzes abdecken) bleibt zukünftige Arbeit.

Als Grundlage für den beschriebenen Auswahlprozess werden die RT-Szenarien aller RT-Anforderungen extrahiert. Dann wird das Risiko aller extrahierten RT-Szenarien analysiert und jedes Szenario mit einem Wert auf einer Risikometrik bewertet. Dieser Wert dient als Indikator dafür, ob das Szenario als nächstes mit der im Folgendem beschriebenen Methodik behandelt werden soll.

### *Einführung von Mechanismen zur Fehlerbehandlung und Rückfallebenen*

In den vorangegangenen Abschnitten haben wir gezeigt, wie Aktivitätsnetze und Aktivitäts-Echtzeitspezifikationen zur Modellierung von Echtzeiteigenschaften verwendet werden können und wie Echtzeitanforderungen im Aktivitätsnetz verankert werden können. Die symbolischen Grenzen der Durchführungsdauer können entweder durch einen Bottom-up-Ansatz spezifiziert werden, bei dem die Grenzen der Durchführungsdauer der untersten Aktivitäten geschätzt und nach oben zu den zusammengesetzten Aktivitäten propagiert werden, oder durch einen Top-down-Ansatz, bei dem die Echtzeitanforderungen an Aktivitäten auf höherer Ebene verwendet und nach unten zu den untersten Aktivitäten propagiert werden. Beide Ansätze helfen uns, kritische Szenarien innerhalb des Aktivitätsnetzes zu identifizieren und zu bewerten.

Wir folgen einem iterativen Prozess, bei dem kritische Aktivitäten identifiziert und aufgelöst werden, indem zusätzliche Fehlerbehandlungs- und Rückfallebenen in das Aktivitätsnetz eingeführt werden. Der gesamte Prozess besteht aus den folgenden Schritten:

1. Zunächst werden die sicherheitsrelevanten Anforderungen erhoben. Aus den sicherheitsrelevanten Anforderungen sind echtzeitbezogene Anforderungen abzuleiten. Die RT-Anforderungen sind im Aktivitätsnetz zu verankern. Für jede Anforderung sind die relevanten Tätigkeiten aus dem Tätigkeitsnetz zu ermitteln.
2. Da das Aktivitätsnetz und das Constraint-System mit den Aktivitäten verknüpft sind, bildet es die Grundlage für die anschließende Ableitung der Constraints. Für jede Anforderung wird das entsprechende Constraint-System abgeleitet und analysiert. Zu jeder RT-Anforderung kann eine Reihe von Aktivitäten und Unteraktivitäten mit den zugehörigen Events zugeordnet werden, die eine Eventkette bilden. Da die Ereignisse innerhalb dieser Eventkette an Bedingungen geknüpft sind, kann die Kritikalität dieser Bedingungen in Bezug auf die Erfüllung der Anforderung bewertet werden.
3. Da die Kritikalität bestimmter Constraints in Abhängigkeit von den Anforderungen ermittelt wurde, werden diese im weiteren Verlauf nach Kritikalität sortiert und ein Schwellwert für die Filterung angewendet.
4. Nun liegen alle kritischen Schranken vor. Das Ziel besteht nun darin, Fehlerbehandlungs- bzw. Rückfallebenen zu entwickeln, um die Auswirkungen einer Verletzung dieser Grenzen zu minimieren. Dies wird für jede kritische Grenze durchgeführt.

Gegebenenfalls müssen nach dem vierten Schritt das bestehende Aktivitätsnetz und die Anforderungen gegebenenfalls angepasst werden, um ein konsistentes System zu gewährleisten. Dazu wird das Aktivitätsnetz erweitert und das zuvor beschriebene Verfahren erneut durchlaufen, wobei die Grenzen von Durchführungsdauern, die Anforderungen, das System der Constraints und die Bewertung der Kritikalität, soweit erforderlich, angepasst werden.

Damit wurde ein iteratives Verfahren zur Absicherung und Echtzeitbehandlung und die zugehörigen Modellierungsschritte und -formalisen beschrieben.

## **Funktions- und HMI-Entwicklung**

Die Funktions- und HMI-Entwicklung in ViVre umfasst die drei Teilbereiche. Die Buchung und Disposition des ViVre-Shuttles, die Entwicklung und Implementierung automatisierter Fahrfunktionen sowie die HMI-Entwicklung. Die jeweiligen Teilbereiche werden im Folgenden ausführlicher beschrieben.

### ***Buchung und Disposition des ViVre-Shuttles***

#### ***Dispositionssystem und Android App***

Das im Projekt ViVre vom DLR entwickelte Dispositionssystem zur Planung der Shuttles basiert auf dem DLR KeepMoving System. KeepMoving-OnDemand wurde bereits im echten Livebetrieb in Hamburg eingesetzt. Während des 1-monatigem Testbetrieb wurden 1325 Kilometer an geplanten Routen mit der Disposition zurückgelegt und mehr als 1000 Passagiere befördert. Zusätzlich zum Dispositionsbackend wurde eine Fahrgast App erstellt um die Shuttles zu buchen.

The screenshot displays the 'KeepMoving-OnDemand' web interface. On the left, there are navigation tabs for 'Routen' and 'Fahrzeuge'. The 'Routen' section includes a search bar for 'Routen abrufen' with a date range of '4/6/2022 - 4/6/2022', a 'JourneyId' field, and buttons for 'Routen suchen' and 'Suche verwerfen'. Below this is a filter section for 'Ergebnisse filtern' and 'Fahrzeug' with an 'IDs' field. The main content area shows a map with a highlighted route and three destination cards on the right:

Nach:	Abfahrt:	Ankunft:	Passagiere:	Buchung ID:	Buchung:	Status:
H1 NFF	Mittwoch, 04.06	14.21	1	444	RSV1846780136	gebucht
H2 Hermann-Blenk-Straß...	Mittwoch, 04.06	14.26	1	445	RSV-1990866405	gebucht
H3 Forschungsparkhaus	Mittwoch, 04.06	14.31	1			

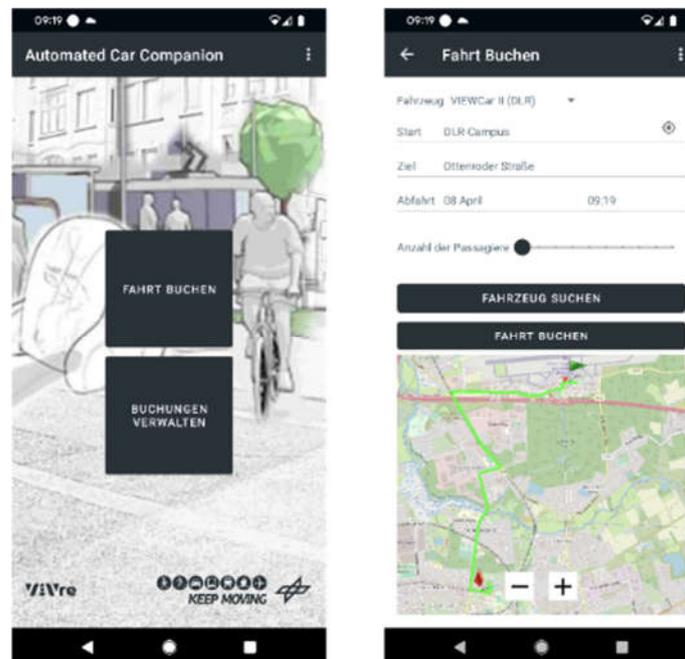


Abbildung 12: Webinterface Disposition: geplante Routen (oben) und Android App zur Fahrtbuchung (unten)

Zur Buchung der bedarfsorientierten Shuttles wurde seitens DLR zusätzlich eine Android App entwickelt. Über diese App können Fahrtanfragen gestellt und Fahrten gebucht werden. Der Buchungsprozess ist 2-teilig gestaltet und besteht aus Reservieren und Buchen. Die Disposition überprüft ob die Nutzeranfrage mit der bereits bestehenden Routenplanung in Einklang gebracht

werden

kann

Nach:	Abfahrt:	Ankunft:	Passagiere:
H1 NFF	14.21	14.22	1
H2 Hermann-Blenk-Straß...	14.26	14.28	1
H3 Forschungsparkhaus	14.31	14.34	1

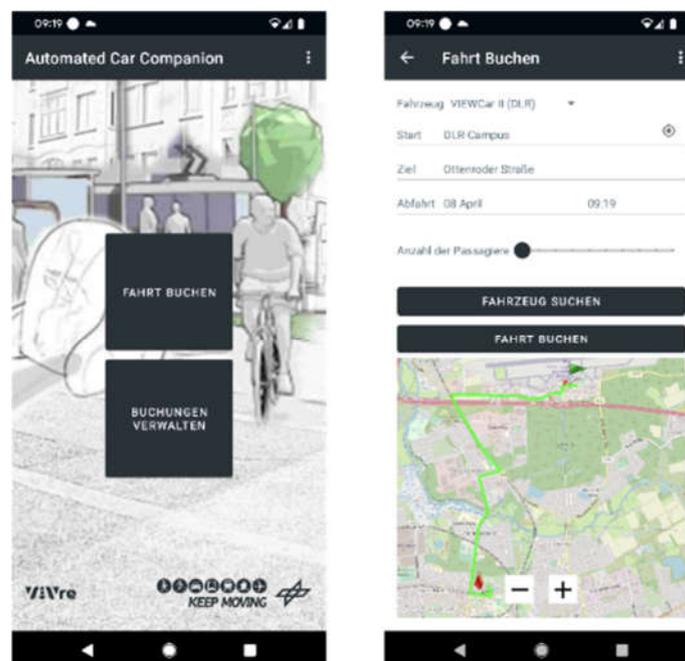


Abbildung 12). Nutzeranfragen aus einem Gebiet und innerhalb eines bestimmten Zeitraums werden zusammengefasst, um die Anzahl an geplanten Haltepunkten und Routen zu reduzieren und somit die Nachhaltigkeit zu verbessern.

### *Virtuelle Haltestellen und Echtzeitlagebilderfassung*

Ein wesentlicher Fokus der Arbeiten im Rahmen von ViVre liegt auf der Berücksichtigung der Anforderungen an Intelligente Verkehrssystemen zur Unterstützung zukünftiger Mobilitätsdienste. Da virtuelle Haltestellen einen starken Einfluss auf den Verkehrsfluss haben können, sollte deren Einrichtung intelligent gesteuert und in Koordination mit den anderen Knoten erfolgen. Dabei ist zu beachten, dass die Einrichtung zwar ohne hohe Infrastrukturkosten umgesetzt werden kann, die Anforderungen an die Haltestelle jedoch mit der Flexibilität des Bedienkonzeptes steigen. Durch das aufeinander treffen verschiedener Verkehrsströme wie Fußgänger, Radfahrer und Fahrzeuge können

komplexe Interaktionen entstehen, welche in Bezug auf virtuelle Haltestellen besondere Beachtung verdienen. Zusätzlich ist es notwendig, die benötigte Abdeckung und Frequentierung des Gebiets zu ermitteln, um die Bedarfe zu befriedigen und Ressourcen effektiv einzusetzen. Neben fest installierten Geräten gibt es auch die Möglichkeit mobile Lösungen, wie zum Beispiel Kameraaufnahmen von Smartphones, einzusetzen. Diese Lösung benötigt einen Abdeckungsgrad (e.g. Flottengröße) um flächendeckend Echtzeitlagebilder zu liefern.

In ViVre wurden grundlegende Anforderungen an virtuelle Haltestellen definiert und eine „Blaupause“ für die zukünftige Umsetzung virtueller Haltestellen konzipiert. Dieses Konzept wurde abschließend in einer Simulation erprobt und validiert (Abbildung 13). Es wurde eine Netzstruktur entwickelt, die verschiedene Kreuzungstypen und Straßenspuren enthält und typischer Straßenverkehr mit PKWs und öffentlichem Nahverkehr in Form von Bussen nachgebildet. Für die Simulation wurden die Flottenfahrzeuge variiert und schrittweise in die Simulation eingespeist, wobei die Flottenfahrzeuge zufällige Routen absolvieren, um die verschiedenen Anforderungen an die Echtzeitlageerfassung zu simulieren. Zur Erfassung möglicher Haltepunkte wurde von Bliq eine Vision APP entwickelt, welche freie Flächen erkennt und benötigte Attribute durch eine GeoJSON-Datei an das Dispositionssystem übermittelt. Dieser Ansatz ermöglicht eine kostengünstige Echtzeitlageerfassung, was die Einführung virtueller Haltestellen und automatisierter Mobilitätsdienstleistungen im innerstädtischen Bereich unterstützt und vorbereitet.

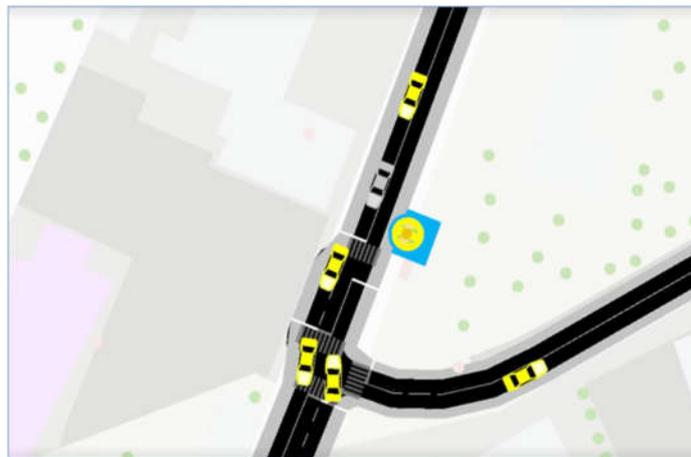


Abbildung 13: Ausschnitt aus der Simulation zur Berechnung der benötigten Flottengröße. Grau repräsentiert Flottenautos, Gelb repräsentiert den restlichen Verkehr.

## ***Entwicklung und Implementierung der automatisierten Fahrfunktion***

### ***Deep-Learning-basierte Perzeption***

Die akkurate Modellierung der Fahrzeugumgebung ist von überragender Wichtigkeit für die sichere Bewegung des automatisierten Fahrzeugs in seiner Umwelt. Die Fahrzeugumgebung lässt sich hierbei im Wesentlichen in bewegliche Objekte wie andere Verkehrsteilnehmer und die statische Verkehrsinfrastruktur wie Fahrstreifen, Kreuzungen und Parkplätze unterteilen. Für Informationen über die Verkehrsinfrastruktur im Umfeld des Fahrzeugs kommen vor allem drei Quellen in Frage: Hochgenaue Karten, V2X-Nachrichten und die bordeigene Wahrnehmung des Fahrzeugs.

Aktuelle Systeme im Bereich des automatisierten Fahrens nutzen vielfach hochgenaue Karten als Grundlage der Verhaltensentscheidung und Trajektoriengenerierung. Dies erfordert massive Investitionen in die Erstellung und Pflege aktueller, fehlerfreier Karten. Bei Fehlern in der Karte, Problemen der Lokalisierungslösung oder dem Erreichen der Kartengrenzen ist dennoch das Eingreifen einer menschlichen Rückfallebene erforderlich. Insbesondere fehlerhafte Lokalisierungen

und durch Baustellen geänderte Spurführungen sind zwei Klassen von Problemen, die schnell zu unsicherem Verhalten wie dem plötzlichen unangekündigten Überfahren der Fahrstreifenbegrenzungen führen.

Die sensorbasierte Wahrnehmung des statischen Fahrzeugumfelds ermöglicht es, Entscheidungen basierend auf der tatsächlichen Verkehrsinfrastruktur zu treffen. Dies entkoppelt die Verhaltensentscheidung von möglichen Fehlern der Lokalisierungslösung und der Karte, vergrößert den Einsatzbereich des Fahrzeugs und erlaubt die dynamische Reaktion auf Änderungen der realen Verkehrsinfrastruktur.

Insbesondere für Shuttles, die im ländlichen Raum verkehren, war es zudem wichtig, eine Lösung zu entwickeln, die auch bei vorübergehenden Ausfällen der V2X-Kommunikationen und ohne externe Sensoren mögliche Bedarfshaltestellen nahe des Zielbereichs identifizieren und bewerten kann.

Daher wurde im Projekt ein Wahrnehmungsmodul für die Wahrnehmung der statischen Verkehrsinfrastruktur entwickelt. Da die visuellen Merkmale, welche die verschiedenen Elemente der Verkehrsinfrastruktur ausmachen, mit traditionellen Ansätzen nur schwer zu modellieren sind, fiel die Wahl auf einen Deep-Learning-basierten Ansatz. Deep-Learning nutzt tiefe künstliche neuronale Netze, welche überragende Leistungen bei einer Vielzahl von schwer zu modellierenden Problemen gezeigt haben. Das im Projekt erstellte Deep-Learning-basierte Wahrnehmungssystem ist in der Lage, semantischen Informationen aus kontextuellen Merkmalen in den Sensordaten abzuleiten und nachgelagerten Funktionen eine Vielzahl von Informationen zur Verfügung zu stellen. Hierzu zählen neben direkt wahrnehmbaren Eigenschaften wie die Position und die Klasse verschiedener Fahrbahnmarkierungen auch semantische Eigenschaften wie nicht direkt markierte Parkmöglichkeiten am Straßenrand, Bushaltestellen ohne entsprechende Beschriftung auf der Fahrbanoberfläche oder die Positionen von unmarkierten Fahrstreifenrändern.

Das Training künstlicher neuronaler Netze erfordert jedoch große Datenmengen von annotierten Daten. Da es unseres Wissens nach bisher keinen Datensatz mit den benötigten Informationen für die angedachte Funktionalität gibt, wurde zunächst ein Datensatz für das Training des Deep-Learning-basierten Wahrnehmungsmoduls erstellt. Das händische Annotieren der für das Training benötigten Grundwahrheit ist jedoch ein äußerst aufwendiger Prozess. Um hier Abhilfe zu schaffen, wurde daher zunächst ein System zur automatischen Generierung der benötigten Trainingsdaten aus den Daten hochgenauer Karten entwickelt. Dieses System ermöglichte es mit geringem manuellem Aufwand, einen ausreichend großen, qualitativ hochwertigen Datensatz für das Training des künstlichen neuronalen Netzes zu erstellen.

### *Perzeption von VRUs mittels Fusion aus Kamera und Lidar*

Die vollständige Detektion und Erfassung von verletzlichen Verkehrsteilnehmern, vor allem von Fußgängern an Überwegen, stellt aufgrund der Stärken und Schwächen verfügbarer Sensoren eine besondere Herausforderung dar. Die Detektion mittels Kamera ergibt unter Anwendung frei verfügbarer Detektionsalgorithmen sehr performante und echtzeitfähige Ergebnisse, zeigt jedoch Schwächen in der Distanzschätzung. Im Kontrast dazu haben Lidarsensoren mit geringer vertikaler Auflösung Schwächen in der Detektion, bei erfolgreicher Detektion jedoch sehr genaue Distanzschätzungen aufgrund des Sensorprinzips der Laufzeitmessung. Zur performanten Erfassung wurde daher ein auf Objektlistenebene-basierendes Fusionskonzept aus Kamera und Lidar entworfen und evaluiert. Ergänzt wird das Konzept um zwei eigens trainierte KI-basierte Modelle zur Richtungsklassifikation von Fußgängern (Nord, West, usw.) sowie der Bewegungsrichtung (Gehen, Stehen) aus Kamerabildern. Abbildung 14 zeigt exemplarisch Ergebnisse aus der Implementierung

der kamerabasierten Objektdetektion über YOLO (Bochikovskiy et al. 2020), des Trackings über deepSort (Wojke et al. 2017) und der Richtungsklassifikation im Versuchsträger.



Abbildung 14: Ergebnisse der kamerabasierten Detektion im Versuchsträger

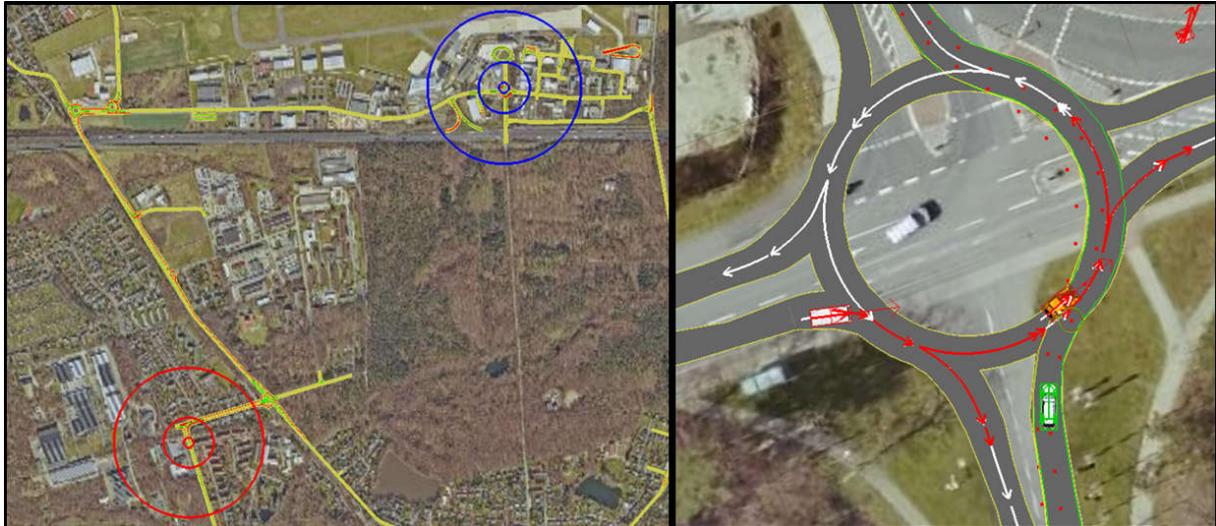
### *Prädiktion von Radfahrern im Straßenverkehr*

Vom Institut für Fahrzeugtechnik der TU Braunschweig wurde als weiterer Use-Case für das automatisierte Fahren im Mobilitätskorridor die Interaktion mit Radfahrern im Straßenverkehr betrachtet und die Ergebnisse in Sonka et al. (2021) veröffentlicht. Hierbei wurden zwei aktuelle Ansätze des maschinellen Lernens zur Verhaltensprädiktion von vorausfahrenden Radfahrern mit einem regelbasierten Basisansatz verglichen. Die erste Methode greift ein Perzeptron auf und vereinfacht die Netzeingabe mittels der polynominalen Approximation zeitlich zurückliegender Bewegungsgrößen. Das Verhalten der vorausfahrenden Radfahrer stellt die Eingabesequenz der untersuchten Long-Short-Term-Memory Netze dar und verkörpert den zweiten betrachteten Ansatz. Hervorzuheben und neuartig ist das Anlernen der beiden Methoden mit einer umfangreichen Datenbank, welche aus realen Radfahrermessdaten besteht und über die Laserscanner-Sensorik eines Versuchsfahrzeuges aufgezeichnet wurde. Die Ergebnisse beider Methoden sind dem Basisansatz überlegen, wobei der Ansatz des Perzeptrons die erfolgversprechendsten Ergebnisse über den gesamten Prädiktionshorizont aufweist. Zusammenfassend ist die Genauigkeit für kürzere Prädiktionisdauern (< 3 Sekunden) als hinreichend anzunehmen und kann durch die Erweiterung der Trainingsdaten verbessert werden. (Sonka et al., 2021)

### *Fahrfunktion*

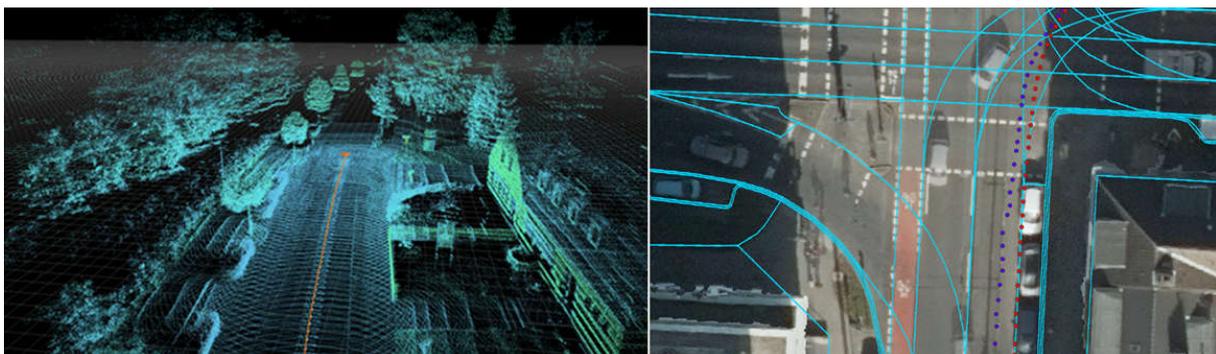
Die urbane Versuchsstrecke in ViVre zeichnet sich durch bewegungsplanerisch komplexe Stellen wie Kreisverkehre und Linksabbiegen durch Gegenverkehr aus. Weiterhin gibt es einen Wechsel aus enger Bebauung und offenem Gelände, sodass weder GPS noch LIDAR-basierte Lokalisierung allein funktionieren. Für die Umsetzung dieser komplexen Fahraufgabe im Projekt kam das am DLR entwickelte Softwareframework „Automated Driving Open Research“ (ADORE) auf dem DLR-Versuchsfahrzeug zum Einsatz. Es setzt auf eine modulare Architektur aus kommunizierenden Prozessen, welche die Teilaufgaben der Bewegungsplanung abbilden. Ein gesondertes Modul übernimmt die Navigationsziele für die Bewegungsplanung und kommuniziert den aktuellen Status des automatisierten Shuttles an das Dispositionssystem. Das ADORe-Framework ist unter <https://github.com/eclipse/adore> veröffentlicht und wird im Anschluss an das Projekt auf den durch ViVre hinzugewonnen Funktionsumfang aktualisiert.

In nachfolgender Abbildung 15 ist beispielhaft die Visualisierung der Bewegungsplanung im Fahrzeug dargestellt. Links: die globale Karte mit aktueller Position (blau) und Zielpunkt aus Dispositionssystem (rot) und rechts: die lokale Karte abweichend von Satellitendaten, Egofahrzeug (grün), andere Verkehrsteilnehmer mit Bewegungsvorhersage in Pfeilform dargestellt.



**Abbildung 15: Visualisierung der Bewegungsplanung im DLR-Fahrzeug**

Um die Umgebung des Fahrzeuges für die Bewegungsplanung zu erfassen, werden aus verschiedenen Sensorquellen (u.a. Kamera-, LiDAR- und GNSS) Daten im DLR-Softwareframework „Buildings Blocks for Sensor Data Processing“ (BoB) aufgearbeitet, verknüpft und zu Datenpaketen für die Bewegungsplanung verpackt. Im Projekt ViVre kam erstmals eine hybride Lokalisierungslösung auf dem DLR-Fahrzeug zum Einsatz. In folgender Abbildung 16 dargestellt. Links: Punktwolke vom LiDAR und rechts: rote gepunktete Linie: nur GPS, blaue Linie: kombinierte Lokalisierung aus GNSS und LiDAR



**Abbildung 16: hybride Lokalisierungslösung**

### *Handlungsplanung und Situationsanalyse im Mobilitätskorridor*

In der Funktionsarchitektur zum automatisierten Fahren des IfFs der TU Braunschweig erfolgt in der Situationsanalyse eine Betrachtung aller verfügbarer Daten aus Umfelderkennung, digitalen Karten sowie weiterer Zustandssensoren mit dem Ziel alle für die Ist-Situation relevanten Informationen zu extrahieren. Diese werden im anschließenden Verarbeitungsschritt in der Handlungsplanung als Eingangsquelle verwendet, um ein Fahrmanöver abzuleiten und anschließend in der Trajektorienplanung die notwendigen Bewegungsgrößen zur Regelung des Fahrzeuges bereitzustellen. Im Rahmen des Projektes ViVre wurde ein modularer Ansatz gewählt und

weitergeführt, in welchem basierend auf digitalem Kartenmaterial automatisiert sogenannte Handlungsareale abgeleitet werden, für welche Regeln und Zustandsautomaten hinterlegt sind. Die modulare Erweiterung umfasste dabei die Implementierung der Areale Kreisverkehr, Kreuzung mit Lichtsignalanlage und virtuelle Haltestelle. Diese sind entlang der Versuchsumgebung im Bereich des Forschungsflughafen Braunschweig in Abbildung 17 hervorgehoben. Die Umsetzung und Realimplementierung wurde während des ViVre-Abschlussevents dem Fachpublikum präsentiert.

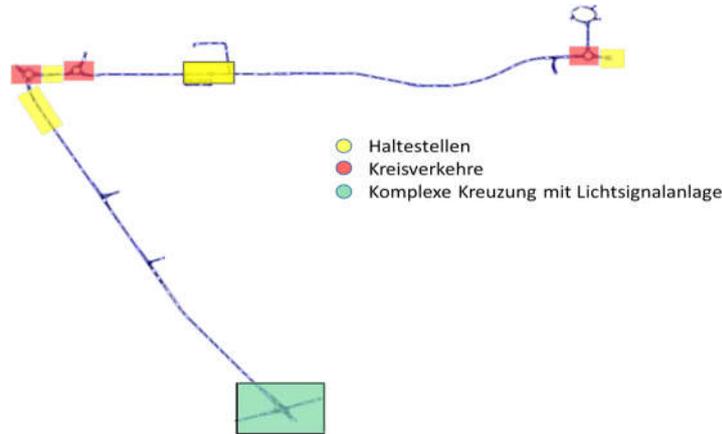


Abbildung 17: Versuchsumgebung Forschungsflughafen BS bis Steinriedendamm mit visualisierten Handlungsarealen

*Fahrfunktion autonomes Parken*

Die Softwarearchitektur für die autonome Parkfunktion wurde auf Level 4 (L4, System) und Level 5 (L5, Komponenten) als Anwendungssoftware (ASW) entwickelt. Abbildung 18 zeigt die L4-ASW-Architektur, in der die Schnittstellen und operative Abläufe zwischen den einzelnen Softwarefunktionsgruppen (SWF) dargestellt werden.

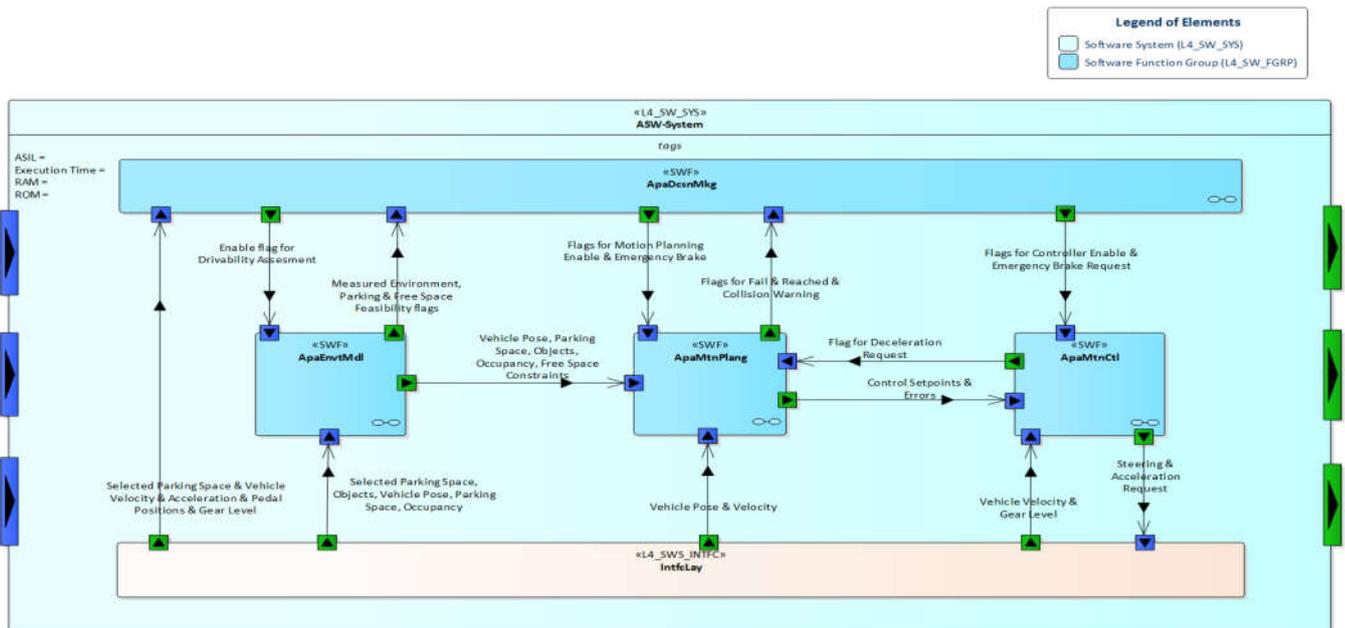


Abbildung 18: L4-ASW-Architektur für autonome Parkfunktion

Insgesamt enthält ASW vier SWF:

1. *Decision Making* (ApaDcsnMkg, Entscheidungsfindung),
2. *Environmental Model* (ApaEnvtMdl, Umgebungsmodell),
3. *Motion Planning* (ApaMtnPlang, Bewegungsplanung),
4. *Motion Control* (ApaMtnCtl, Bewegungssteuerung).

Die Komponenten dieser Funktionsgruppen wurden im Laufe des Projekts entwickelt und einzeln und zusammen getestet (*open-loop*). Die Simulationsumgebung wurde für die Gesamtintegration vorbereitet. Zuletzt erfolgte die Komponentenintegration (*closed-loop*) in die Simulationsumgebung in VTD (Vires Virtual Test Drive) und die Demovorbereitung anhand des Use Cases ‚Nutzung der ÖPNV-Infrastruktur / Haltestelle‘ in Form eines Videos (Abbildung 19).  
 Nachstehend werden die einzelnen L5-SWF-Architekturen auf Komponentenebene beschrieben.



Abbildung 19: Zusammenspiel der Komponenten in der Simulation

1. Die SWF **Decision Making** ist verantwortlich für die Erkennung des Systemzustands, basierend auf den Eingaben aus anderen Funktionsgruppen und Systemkomponenten. Hier wird auch der Informationsaustausch zwischen dem Nutzer und dem System über HMI koordiniert. Die Zustandsbestimmung (State Determination) ist eine Diagnosekomponente, die auf der Grundlage vordefinierter Bedingungen die Funktion aktiviert/deaktiviert - dies ist die Kernkomponente der Entscheidungsfindung. Sie stellt eine deterministische endliche Zustandsmaschine mit einem regelbasierten Programmieransatz dar.

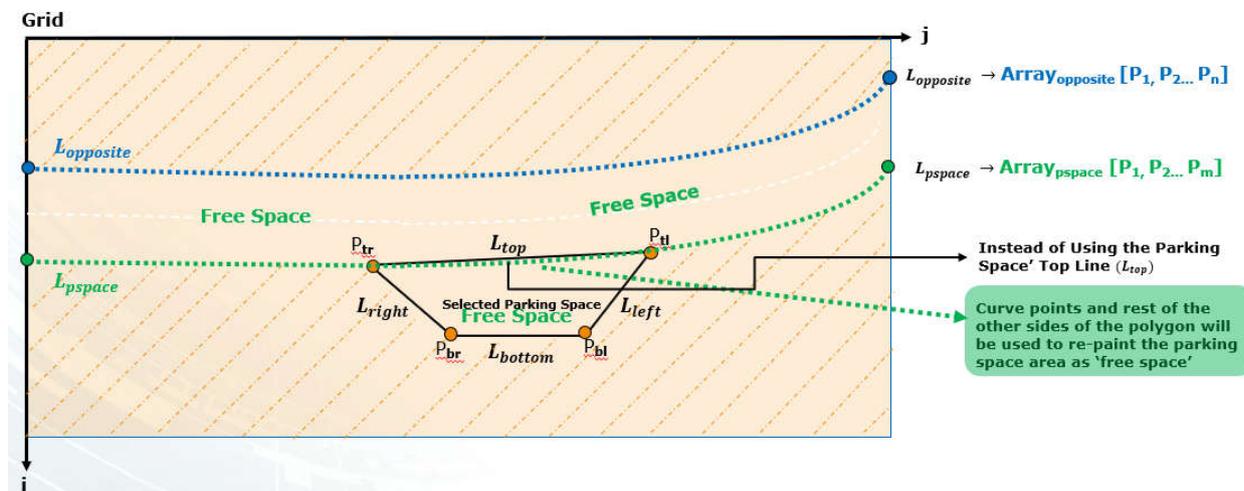


Abbildung 20: Ermittlung des befahrbaren Bereichs zum Parken

2. Das Ziel des SWF **Environmental Model** ist es, die Umgebung in ausreichendem Maße zu modellieren. Das zu modellierende Umgebungselement enthält eine einzelne SW-Komponente namens Drivable Space Recognition. Dessen Ziel ist es, einen befahrbaren Bereich unter Berücksichtigung der Zulässigkeit, Fahrzeugform und Kinematik zu erhalten (Abbildung 20).

3. Die SWF **Motion Planning** zielt darauf ab, eine durchführbare Trajektorie für die Einpark- und Einfädelmanöver zu planen. Die Bewegungsplanung besteht aus folgenden Komponenten:

- Path Planning - Space Exploration: Der Algorithmus zur Pfadgenerierung verwendet den Shuttle-Fahrzeugzustand und die Informationen aus dem Umgebungsmodell und implementiert die Methode des *Closed-Loop Rapidly-Exploring Random Tree* – CL-RRT (Kuwata et al., 2009).
  - Connection Generator: Die Space Generation Komponente erzeugt mehrere Pfade innerhalb der vordefinierten Gier- und Positionsfehlertoleranzen entweder an der Anfangs- oder der Zielposition des Fahrzeugs. Es ist erforderlich, dass die maximale Krümmung dieser Pfade begrenzt und eine geometrische Kontinuität G1 erster Ordnung (Position und Richtung von der Startpose zum generierten Pfad) sicherstellt werden. Für diese G1-Kontinuität wird der Dubins-Pfad-Ansatz als Verbindungsgenerator implementiert.
  - Path Smoothing: Der Pfadglättungsalgorithmus stellt die geometrische Kontinuität zweiter Ordnung G2 (zusätzlich die Krümmungskontinuität) entlang des gesamten Pfads sicher. Als Pfadglättungsalgorithmus wird der  $\beta$ -Spline-Generator (Gómez-Bravo et al., 2008) verwendet.
  - Trajectory Generation: Die Funktionskomponente Trajektoriengenerator weist den vorhin erzeugten Pfaden das passende Geschwindigkeitsprofil zu. Der Algorithmus hinter der Funktion ist Jerk Optimal Velocity Profile-Method (Holmer, 2016). Wesentliches Merkmal dieses Ansatzes ist die Abstraktion des Profilings in drei Teile: Beschleunigung, konstante Geschwindigkeit und Verzögerung. Dies ermöglicht der Steuerung, auf komfortable Weise eine vollständige Längssteuerung zu erreichen.
  - Collision Check: Die in diesem Projekt verwendete Methode zur Fußabdruckprüfung ist eine Kombination aus zwei verschiedenen Methoden: Die Umgebungsprüfung erfolgt mit einer erweiterten Version des schnellen Kollisionsprüfungsalgorithmus von Ziegler und Stiller (Ziegler & Stiller, 2010). Die Prüfung auf dynamische Objekte wird mit dem Algorithmus namens Trennungssatz (*Separating Axis Theorem*, SAT) implementiert (Huynh, 2008).
  - Trajectory Selection: Diese Komponente erhält einen Satz der möglichen Trajektorien und wendet eine Kostenfunktion darauf an. Anschließend wird die Minimalkostentrajektorie ausgewählt.
  - Motion Control Setpoint Generation: Diese Funktionskomponente ist dafür verantwortlich, die komplexe Datenstruktur der ausgewählten Trajektorie in Eingangssignale für die Bewegungssteuerung umzuwandeln.
4. Die SWF **Motion Control** besteht aus Funktionskomponenten Longitudinal Control und Lateral Control und führt die Quer- und Längssteuerung des Fahrzeugs durch, wobei die in der Bewegungsplanung generierten Bewegungssteuerungssollwerte konsumiert werden und notwendige Steuersignale für Aktuatoren als Ausgang erzeugt werden (Gómez-Bravo et al., 2001).

### Querregelung

Eine der Grundvoraussetzungen für die Realisierung automatisierter Fahrfunktionen ist eine Querregelung, welche als abschließendes Funktionsmodul die Vorgaben aus der Trajektorienplanung in eine Sollvorgabe für den Lenkaktor übersetzt und somit die Schnittstelle zwischen Fahrfunktion und Fahrzeugansteuerung bildet. Im Rahmen des Projektes wurde vom IfF der TU Braunschweig die Konzeption, Realimplementierung sowie Validierung einer sogenannten modellprädiktiven Querregelung im urbanen Straßenverkehr bis 50 km/h vorgenommen. Die untersuchten Streckenprofile decken repräsentative Fahrmanöver wie Spurwechsel, U-Turn, Kreisverkehr, Abbiegen und Kurvenfahrt bis hin zu maximalem Lenkwinkelanschlag, schnelle Kurvenfahrten sowie lange Geradeausfahrten und Parkmanöver ab. Die Idee einer modellprädiktiven Regelung ist es, auf Basis eines zu definierenden Streckenmodells den optimalen Verlauf der Regelgröße vorauszusagen.

Aus dem Verlauf der Regelabweichung und der Regelgröße wird eine Kostenfunktion aufgestellt, die es zu minimieren gilt. Unter Berücksichtigung der Fahrzeugkinematik resultiert hierbei ein nichtlineares Optimierungsproblem. Aufgrund der mathematischen Komplexität und damit hohen Rechenleistung wurde das Optimierungsproblem im Rahmen der Entwicklung linearisiert und so eine Echtzeitfähigkeit des Ansatzes ermöglicht. Die entwickelte modellprädiktive Querführung zeigt in Untersuchungen im Vergleich zu klassischen Reglerkonzepten die besten Ergebnisse sowohl in Bezug auf die Regelgenauigkeit als auch auf Komfortaspekte, wie z.B. eine minimale mittlere Lenkwinkelgeschwindigkeit. Abbildung 21 zeigt ein Beispiel der Regelabweichung für eine repräsentative Stadtfahrt mit vielseitigem Fahrprofil inkl. 90°-Kurven und U-Turn. Die Ergebnisse wurden in Kascha (2022) veröffentlicht. (Kascha, 2022)

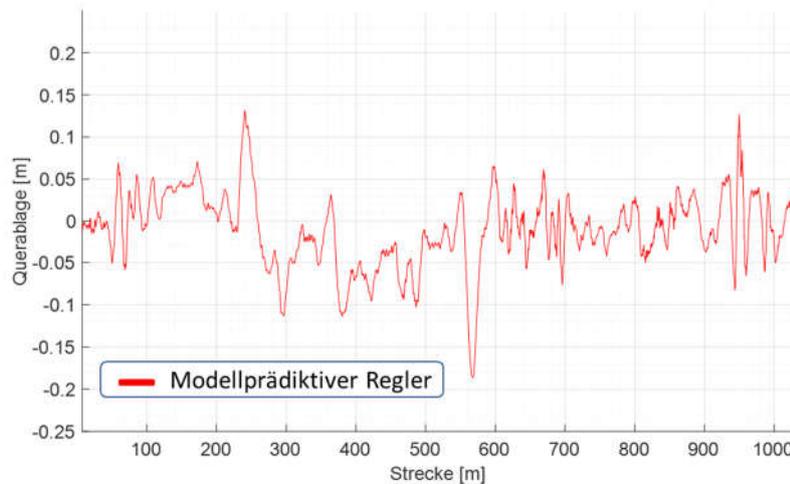


Abbildung 21: Regelabweichung der entwickelten Querregelung für eine repräsentative Stadtfahrt

## HMI-Entwicklung

### Externales HMI

Um eine objektiv sichere und subjektiv akzeptierte Einführung hochautomatisierter und vernetzter Fahrzeuge (AVF; ab SAE 4) in den Straßenverkehr zu gewährleisten, ist eine ganzheitliche Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion (HMI) der AVFs und ihrer dazu notwendigen Schnittstellen mit dem Menschen von großer Bedeutung. Dabei sind besonders zweierlei Interaktionspartner\*innen von AVF zu bedenken: zum einen die umgebenden, betroffenen Verkehrsteilnehmenden und zum anderen die Nutzenden eines AVF selbst. In ViVre wurden Forschungsarbeiten zur Interaktion mit umgebenden Verkehrsteilnehmern an virtuellen Haltestellen durchgeführt. Ziel war dabei eine möglichst vorhersagbare und transparente Interaktion zur subjektiven Unsicherheitsreduktion und Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit von AVF. Eine nach Außen gerichtete, explizite Kommunikation (eHMI) wurde hierfür seitens DLR durch die Integration eines LED-Lichtbandes in die Fahrzeugkarosserie des AVF realisiert und kann in zwei unterschiedliche lichtbasierte Kommunikationsstrategien, wahrnehmungsbasiert und intentionsbasiert, unterteilt werden. Ersteres spiegelt an umgebene Verkehrsteilnehmer, was die Automation erfasst hat und erzeugt so ein gemeinsames Verständnis der Verkehrssituation (siehe Abbildung 22). Letzteres kommuniziert aktuelle und zukünftige Manöver des AVF an seine Umwelt. Zusätzlich wurde der Einfluss impliziter Kommunikation mittels speziell parametrisierter Fahrdynamik (dynamisches HMI; dHMI) untersucht.



Abbildung 22: Externes HMI als cyan-grünes LED-Lichtband mit einer wahrnehmungsbasierten Kommunikationsstrategie (Erfassung von Radfahrer und Fußgänger)

Erste Ergebnisse konnten zeigen, dass eine defensive Fahrdynamik des AVF beim Anfahren virtueller Haltestellen aus der Perspektive zusteigender Personen als vertrauensfördernd und besser zustiegsvorbereitend eingeschätzt wurde. Dabei zeigte sich die Kombination mit konsistenter expliziter Kommunikation als förderlich. Darüber hinaus konnte auch aus der Perspektive des rückwärtigen Verkehrs gezeigt werden, dass explizite Kommunikation der Automation via eHMI das subjektive Nutzererlebnis (Unsicherheit, Vorhersagbarkeit, Informationsgehalt) für Haltemanöver an virtuellen Haltestellen signifikant verbessern. Die Studien stellen einzelne Bausteine (hier v.A. die externe Perspektive) einer ganzheitlichen HMI-Gestaltung der Automation dar. Darüber hinaus besteht die Forschungsnotwendigkeit hinsichtlich aufeinander abgestimmter HMIs für eine ganzheitliche Gestaltungsperspektive.

### *Internales HMI*

Das IfF der TU Braunschweig hat die Konzeption und Implementierung eines internalen HMIs übernommen. Ziel hierbei war es, den Nutzer über das interne HMI zu Informationen zum Fahrverlauf (nächste befahrene Haltestelle, voraussichtliche Ankunftszeit usw.) zur Verfügung zu stellen sowie die Akzeptanz in die automatisierte Fahrfunktion mittels Informationen zu Fahrmanövern und Objektinformationen zu steigern. Während der Fahrt wurden die Passagiere über folgende Manöver des automatisierten Fahrzeugs informiert: Detektion von Fußgängern, Befahren eines Kreisverkehrs, Start- und Ankunft an einer Haltestelle sowie das Annähern an eine Kreuzung mit LSA. Optisch wurde ein möglichst minimalistisches und übersichtliches Design präferiert. Abbildung 23 zeigt zwei exemplarische Screens des internalen HMIs, dargestellt auf dem Multimediasdisplay des Versuchsträgers TEASY 3 (VW Passat).

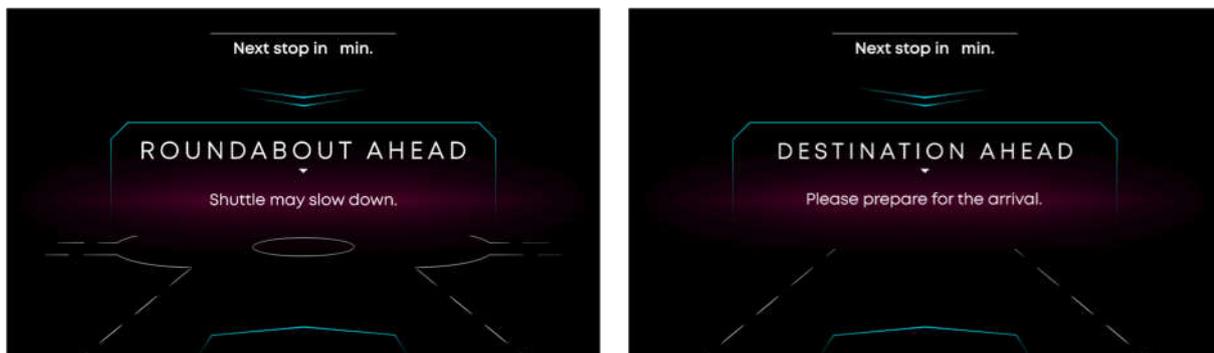


Abbildung 23: Exemplarische Screens des internalen HMIs

### **ÖPNV-Priorisierung**

Das Ziel der ÖPNV-Priorisierung im Projekt war die Konzeptionierung und Realisierung eines kooperativen Systems zur Priorisierung des Shuttles an einer digitalen urbanen Straßenkreuzung. Herausfordernd war in diesem Hintergrund die Loslösung von bisherigen technischen Herangehensweisen und die Aufbereitung des technischen Neulandes in der LSA-Steuerung. Die Priorisierung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) wird an signalisierten Kreuzungen eingesetzt, um die Fahrzeiten zu verkürzen und die Attraktivität des ÖPNV zu erhöhen. In Zukunft sollen analoge Kommunikationstechnologien für die ÖPNV-Priorisierung durch die vielversprechende Vehicle-to-Everything (V2X)-Technologie ersetzt werden. Für das Projekt wird ein ganzheitlicher Ansatz vorgestellt, der V2X-Kommunikation für die Priorisierung im öffentlichen Verkehr für ein automatisiertes Fahrzeug nutzt. Um die Vorteile der V2X-Technologie voll auszuschöpfen, bedeutet dies, die Verkehrsinfrastruktur V2X-fähig zu machen und die Art der Kommunikation sowie die Ampelsteuerung zu ändern. Der Ansatz wurde unter realen Bedingungen an der Forschungskreuzung Tostmannplatz in Braunschweig umgesetzt und getestet.

Um die Priorisierung von V2X-fähigen Fahrzeugen zu ermöglichen, wurde ein TLC-Algorithmus benötigt, der die Daten der Fahrzeuge nutzt. Herkömmliche TLC-Verfahren wie zeit- oder verkehrsabhängige Steuerungen bieten keine Methoden für den Empfang und die Verarbeitung von V2X-Daten. Die in dieser Arbeit verwendete Methode heißt AGLOSA (Adaptive Control Algorithm with Green Light Optimal Speed Advisory), ein vom DLR entwickelter und in [Erdmann 2013] erstmals vorgestellter Algorithmus, der vernetzte Fahrzeugdaten einbezieht. Der grundlegende Ansatz von AGLOSA besteht darin, die Ankunftszeiten aller detektierten Fahrzeuge an der geregelten Kreuzung vorherzusagen und eine Phasenabfolge zu planen, die ein vorgegebenes Optimierungsziel minimiert, zum Beispiel Zeitverlust oder Anzahl der Stopps. Teil der optimalen Phasenabfolge kann die Bereitstellung von GLOSA-Informationen für Fahrzeuge sein, um die Ankunft von Fahrzeugen zu verzögern, damit sie die Kreuzung ohne Halt passieren können. Aufgrund der Komplexität des Optimierungsverfahrens kann AGLOSA nicht direkt auf dem Verkehrsrechner betrieben werden, sondern muss auf einer separaten Anwendungseinheit betrieben werden. Um den aktuellen Zustand der realen Welt und damit die Positionen und Zeitverluste der Fahrzeuge abzuschätzen, wird eine interne Zustandssimulation durchgeführt.

In diesem Anwendungsfall wurden zwei Erkennungsmethoden eingesetzt. Da nur wenige Fahrzeuge bereits V2X nutzen, sind alternative Erfassungsmethoden erforderlich. Am Tostmannplatz wurden Magnetfeldsensoren installiert, um Fahrzeuge an den Zufahrten der Kreuzung zu erfassen. Der große Vorteil dieser Sensoren im Vergleich zu Induktionsschleifen ist, dass sie die Daten drahtlos an das Verkehrssteuerungsgerät übertragen und somit einen minimalen Installationsaufwand verursachen. Als zusätzliche Datenquelle wurden Infrarotkameras zur Objekterkennung installiert. Diese Kameras können nicht nur Anwesenheitsdaten von Fahrzeugen liefern, sondern bieten stellen auch eine Datenschnittstelle für Parameter wie die aktuelle Geschwindigkeit und die Fahrzeugabmessungen zur Verfügung. Leider waren die Sensoren am Tostmannplatz während der Feldversuche nicht funktionsfähig und konnten nicht als Datenquelle genutzt werden.

Die andere Erkennungsmethode ist das Einsetzen eines autonomen Shuttles in die Simulation durch Signal Request Extended Message (SREM). Beim Empfang der Nachricht wird die in der Nachricht enthaltene Fahrzeugposition an die interne Zustandssimulation weitergeleitet, und dort wird ein Fahrzeug mit der entsprechend der Koordinate platziert. Jedes Mal, wenn eine neue Position

empfangen wird, wird das Fahrzeug zu dieser neuen Koordinate bewegt. Die resultierende Geschwindigkeit kann dann von AGLOSA verwendet werden, um die Ankunft des Fahrzeugs an der Ampel vorherzusagen und den erforderlichen Beginn der Grünphase zu berechnen.

Das V2X-Software-Framework ist eine Java-Anwendung für die Übertragung (Senden und Empfangen) von Nachrichten über das GeoNetworking-Protokoll. Das Anwendungs-Framework verbirgt die Komplexität, die zum Erstellen, Senden und Empfangen von V2X-Nachrichten erforderlich ist. Es bietet eine benutzerfreundliche API, die an die Bedürfnisse des jeweiligen Anwendungsfalls angepasst werden kann. Für das Projekt wurde die Schnittstelle zu ROS (Robot Operating System) [ROS] verwendet. ROS bot sich an, da es für die Python-Implementierung von AGLOSA keine Schnittstelle zum V2X-Framework gab. Allerdings können Python-Programme in ROS eingebettet werden, so dass keine neue Schnittstelle geschaffen werden musste.

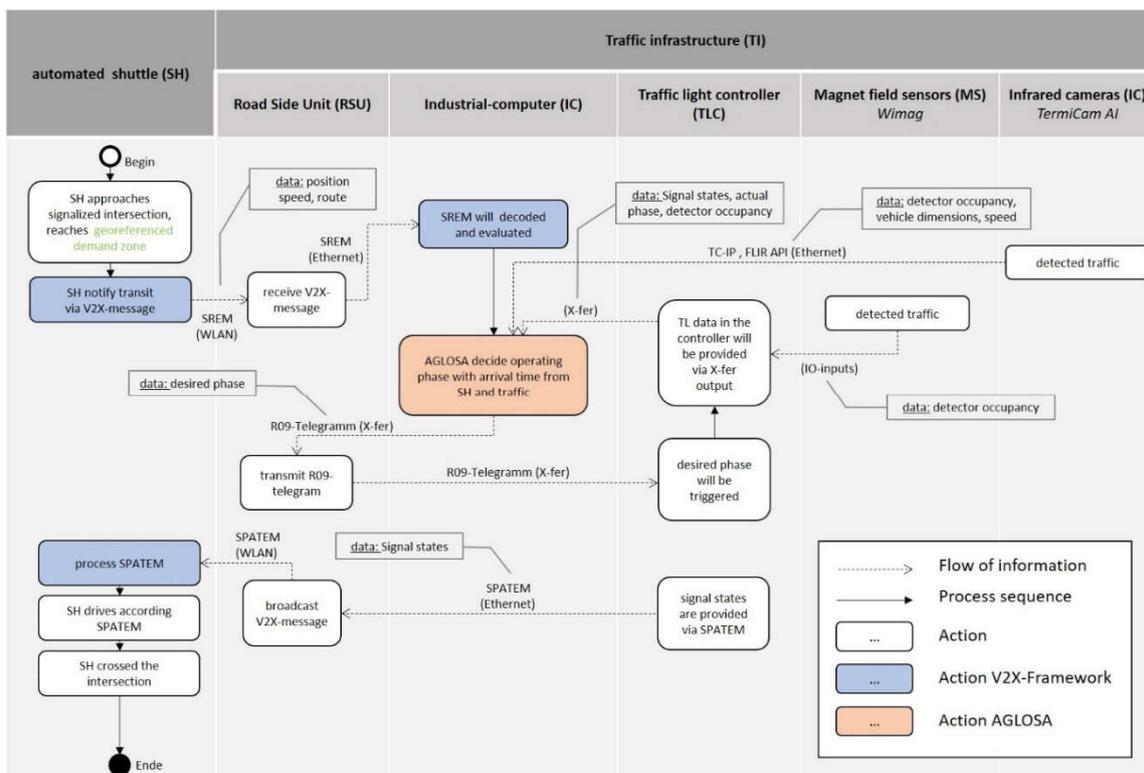


Abbildung 24: Konzept 1

Konzept 1 (Abbildung 24) zeigt eine gemeinsame Priorisierung des öffentlichen Verkehrs an einer signalisierten Kreuzung, die mit V2X umgesetzt wird, um den Zeitverlust des automatisierten Shuttles beim Überqueren der Kreuzung zu minimieren:

Die Route des Shuttles über die Kreuzung ist a priori bekannt. Sobald sich der automatisierte Shuttle der Kreuzung nähert und eine georeferenzierte Anforderungszone erreicht, sendet er kontinuierlich ein SREM mit seiner aktuellen Position, Geschwindigkeit und der Identität des öffentlichen Verkehrsmittels. Die RSU empfängt das SREM und stellt die aktuellen Informationen über den Shuttle für den Steuerungsalgorithmus AGLOSA bereit. Der Steuerungsalgorithmus schätzt mit Hilfe der mikroskopischen Simulation SUMO [SUMO] die Ankunftszeiten der Fahrzeuge an der Kreuzung und optimiert die Phasenfolge an der Ampel, um ein vorgegebenes Optimierungsziel (z.B. Zeitverlust, Anzahl der Halte) zu minimieren. In der Simulation wird die gesamte Kreuzung Tostmannplatz

nachgebildet. Alle motorisierten Verkehrsteilnehmer werden durch Cooperative Awareness Messages (CAM) 70-100m vor den Haltelinien erkannt. Für jede Detektion wird ein simuliertes Fahrzeug mit seiner übermittelten Geschwindigkeit und seinem Fahrzeugtyp in die SUMO-Simulation eingefügt. Durch die Bereitstellung von CAM kann das Fahrverhalten der Fahrzeuge genau modelliert werden, da ihre Positionen und Geschwindigkeiten häufig aktualisiert werden können. Sollten für einen kurzen Zeitraum keine Informationen vorliegen, wird das Verhalten einzelner Fahrzeuge durch die Simulation anhand der Zustandsinformationen der letzten Nachricht geschätzt. Diese Zustandsinformation kann in AGLOSA eingespeist werden, um die Phasenfolge der Ampel zu optimieren.

Das Shuttle liefert seine Zustandsinformation, d.h. seine aktuelle Position und Geschwindigkeit, über SREM. Im Vergleich zu allen anderen in die Simulation eingefügten Verkehrsteilnehmern hat das Shuttle eine sehr hohe Priorität, so dass das Shuttle bei Schaltentscheidungen von AGLOSA immer bevorzugt wird. Die Schnittstelle zwischen AGLOSA und dem Lichtsignalsteuergerät wird durch das Senden von R09-Bus Nachrichten an die Xfer RSU realisiert. Die RSU selbst generiert aus den Lichtsignalinformationen des Lichtsignalsteuergerätes eine V2X-Nachricht namens Signal Phase and Timing Extended Message (SPATEM). Diese Nachricht gibt Auskunft über die aktuellen Signalzustände an der signalisierten Kreuzung Tostmannplatz. Aus der SPATEM kann das Shuttle direkt ablesen, ob seiner Priorisierungsanfrage stattgegeben wurde oder nicht. Ein Alternativweg, um über den Status einer Priorisierungsanfrage zu informieren, ist das Senden einer Signal Request Status Extended Message (SSEM). Da dieselbe Information implizit in der SPATEM enthalten war, wurde in diesem Szenario auf die SSEM verzichtet. Die SPATEM wird über die RSU an den automatisierten Shuttle gesendet. Die Automatisierung des Shuttles fährt entsprechend der Information über den Zustand des Lichtsignals.

In Konzept 2 (Abbildung 25) werden Lichtanlagensignale zum Schutz des automatischen Shuttles beim Verlassen einer Haltestelle verwendet. Wie in Konzept 1 wurde auch dieser Ansatz mit V2X umgesetzt. Konzept 2 verbessert die Verkehrssicherheit und minimiert den Zeitverlust des automatischen Shuttles an Haltestellen.

Der Prozess beginnt, nachdem der Shuttle an der Kreuzung angekommen ist und in einer Haltestelle neben der Straße angehalten hat. Wenn der Shuttle weiterfahren möchte, sendet es eine SREM, in dem er Informationen über seine gewünschte Abfahrt von der Haltestelle übermittelt. Die Idee ist, das Shuttle vor anderen kollidierenden Verkehrsströmen durch eine passende Signalphase zu schützen. Die SREM-Nachricht wird von der RSU empfangen und auf die gleiche Weise wie in Konzept 1 verarbeitet. Die kollidierenden Verkehrsströme des Shuttles erhalten für eine kurze Zeit rote Signale. Der automatisierte Shuttle prüft nun mit seinen eigenen Sensoren, ob die Verkehrsverhältnisse es zulassen, dass er wieder auf die Straße fahren kann, ohne durch Signale geschützt zu sein. Wenn dies möglich ist, verlässt das Shuttle die Bucht. Ist dies nicht möglich, z. B. aufgrund von starkem Verkehr, wartet das Shuttle, bis es eine SPATEM erhält, die anzeigt, dass die Signalzustände auf die geschützte Phase umgeschaltet sind. Wenn kein Verkehr mehr auf dem Fahrstreifen ist, fährt das Shuttle aus der Bucht heraus.

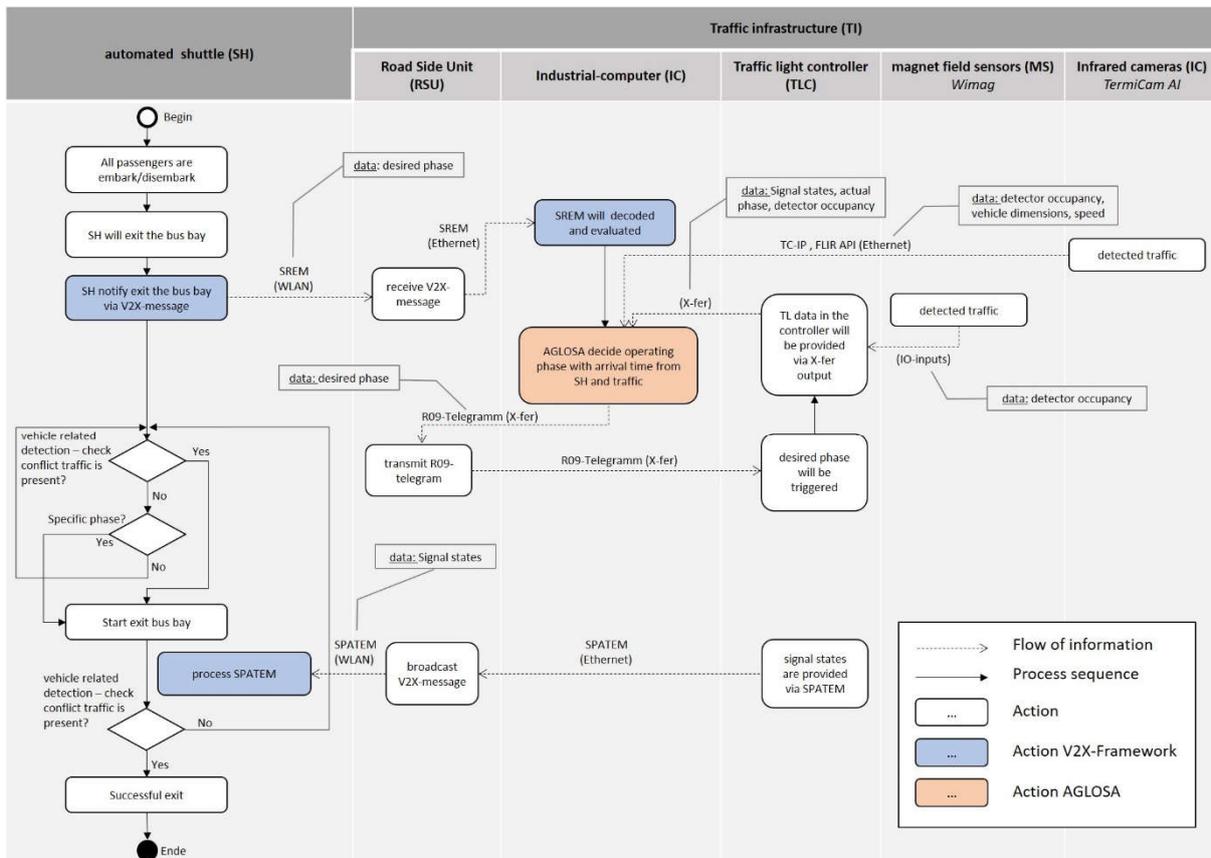


Abbildung 25: Konzept 2

Beide Konzepte wurden an der Forschungskreuzung Tostmannplatz in Braunschweig getestet. Alle notwendigen Infrastrukturkomponenten waren bereits installiert, mit Ausnahme des ICs. Leider konnte AGLOSA nicht die Ankunftszeit jedes Fahrzeugs an der Kreuzung empfangen, da die Erkennung von nicht angeschlossenen Fahrzeugen nicht funktionierte. Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Systemarchitektur wurde jedoch vollständig umgesetzt. Bei den Tests wird das Forschungsfahrzeug View Car II des DLR als automatisierter Shuttle eingesetzt. Erste Tests zeigen, dass alle Kommunikationskanäle funktionierten und das automatisierte Shuttle die gewünschte Phase in der Ampelsteuerung auslösen konnte. Ergänzend zu den oben beschriebenen Arbeiten am Tostmannplatz in Braunschweig wurde ein maßgeschneiderter Eingriff in die LSA-Steuerung eines Knotenpunktes zur adäquaten Priorisierung des automatisiert fahrenden Shuttles als Simulation erstellt. Dabei mussten die Verhältnismäßigkeiten der Priorisierung gewahrt bleiben, so dass für andere Verkehrsteilnehmer (Kfz-, Rad- und Fußverkehr) eine ausreichende Freigabezeit zur Verfügung steht. Damit die genannten Ziele umgesetzt werden konnten, wurde zunächst ein Verständnis über den SREM-Aufbau und dessen Möglichkeiten zum Einsatz für die Priorisierung des Shuttles in Erfahrung gebracht. Es folgte die technische Aufbereitung der vom Fahrzeug gesendeten Daten zur Integration in die LSA-Steuerung. Parallel dazu fand die Konzeption neuer SREM-Steuerungsfunktionen im Verkehrsingenieurarbeitsplatz statt, welche die SREM-Informationen verarbeiten können. Die neuen Steuerungsfunktionen lesen die gesendeten Daten entsprechend aus und wurden geschickt in den in den Regelablauf von einer bestehenden Steuerung eingebettet. Nach erfolgreichen Steuerungstests im LISA-internen-Testplatz und sich einem dadurch gebildeten Erfahrungsgewinn bezüglich der Parametrisierung der SREM-Steuerungsfunktionen und deren Auswirkungen auf den Verkehrsablauf am Knotenpunkt, erfolgte die Umsetzung der realen Steuerung und Datenübertragung in der virtuellen Laborumgebung.

### V2V-Kommunikation

Die V2V-Kommunikation zwischen dem Shuttle und den vernetzten Verkehrsteilnehmern wurde mithilfe von waveBEE Plus Plattform von Nordsys GmbH als On-Board-Unit umgesetzt. Das Set-up für die Demonstration (Abbildung 26) bestand aus zwei Fahrzeugen (Sender und Empfänger), jeweils einer waveBEE sowie weiterer Hardware:

- Ajunic ECU im Senderfahrzeug zur Kommunikation zwischen Fahrzeug und waveBEE,
- CARCIT Tablet im Empfängerfahrzeug als Anzeigesystem für den Fahrer.

Die einzelnen Hard- und Softwarekomponenten spielen dabei wie folgt zusammen:

- Die ausgehenden Signale des Shuttles sind bereits übersetzte CAN-Signale, die durch die AVL-hauseigene Ajunic ECU vorbereitet werden. Diese Steuereinheit ist am Fahrzeug-CAN-Interface angebunden, liest die am CAN-Socket ankommenden Signale aus und übersetzt diese, um sie anschließend über TCP-Socket-Kommunikation an die waveBEE zu übertragen.
- Über den von Nordsys zu Verfügung gestellten waveBEE-Stack werden die vordefinierten Signale gesetzt und über das Broadcast-Verfahren als standardisierte Nachrichten (CAM) übertragen.
- Auf der anderen Seite werden die Signale von der waveBEE empfangen und ebenfalls über TCP-Socket-Kommunikation an das CARKIT weitergeleitet.
- Die auf dem Tablet implementierte Anwendung interpretiert die Informationen und gibt schließlich Texthinweise für den Fahrer in einem Pop-up-Fenster aus. Zusätzlich im Hintergrund läuft die vorinstallierte CARCIT-Anwendung, in der beide Fahrzeuge auf einer Karte angezeigt werden (Abbildung 27).

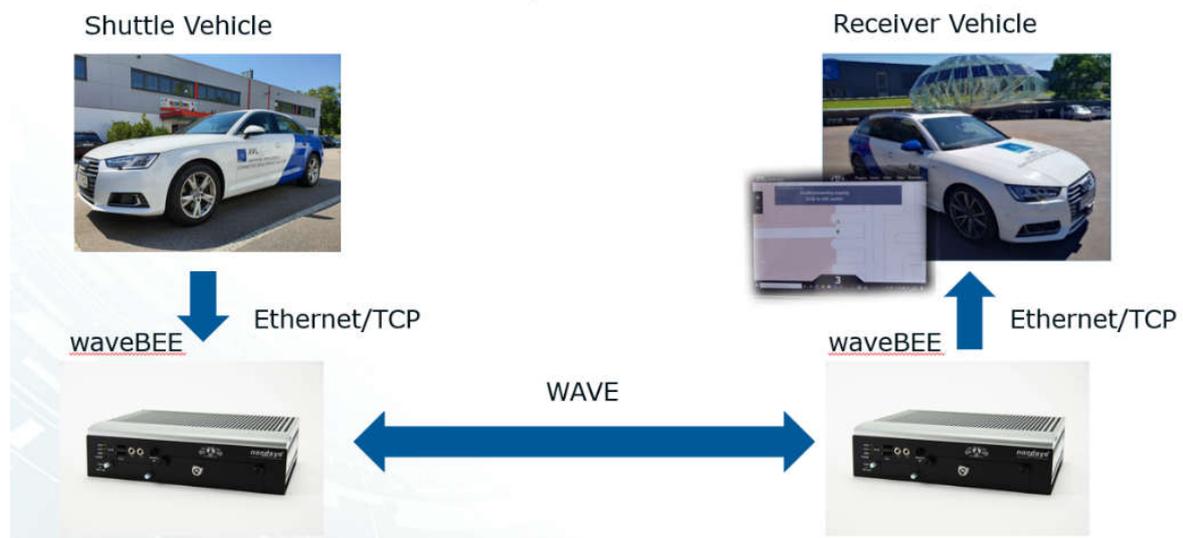


Abbildung 26: V2V Set-up. Der AVL-KI-Audi repräsentiert das Shuttle-Fahrzeug. Das Empfängerfahrzeug wurde hier von dem AVL-ADAS-Audi dargestellt.

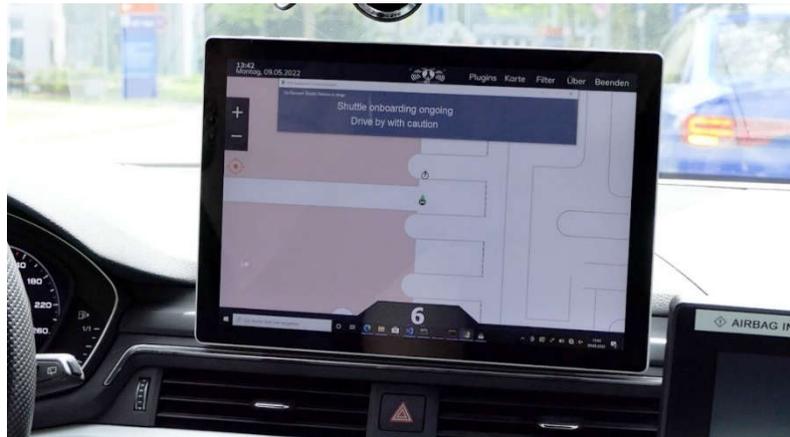


Abbildung 27: Empfängerfahrzeug HMI

Ausgehende Signale des Shuttles sind: Blinker Rechts, Blinker Links, Warnblinker, Bremspedal. Es wird außerdem ein „*Stop flag*“ beim Loslassen der Bremse gesetzt, um das Ende des Boardingprozesses und Wiedereinfädelung des Shuttles zu signalisieren. Je nach Kombination der empfangenen Signale werden die Situationen interpretiert und entsprechende Statusmeldungen, wie in Tabelle 2.5 aufgelistet, ausgegeben.

Tabelle 2.5: Interpretation der Signalkombinationen in der Anwendung

Signalkombination	Anzeige
Blinker Rechts	Shuttle in front is stopping Please wait!!!
Warnblinker	Shuttle onboarding ongoing Drive by with caution
Blinker Links + Bremspedal betätigt	Shuttle prepares for drive Please wait!!!
Blinker Links + Bremspedal losgelassen Setzt Stop flag = 1	Shuttle is merging into traffic Please wait!!!
Blinker Links aus + Stop flag = 1 Setzt Stop flag = 0	The drive may resume

## Simulation, Absicherung des Echtzeitverhaltens und Demonstrator

### Simulation des ViVre-Mobilitätsdienstes

Das Institut für Verkehr und Stadtbauwesen (IVS) der TU Braunschweig erarbeitete innerhalb von AP6 die Rahmenbedingungen und die Methodik für eine Simulationsstudie mit der Software SUMO (Lopez et al. 2018) zur Untersuchung des ViVre-Mobilitätsdienstes. Als Basis diente dabei das SUMO-Braunschweig-Szenario, das vom DLR als open-source Datei zur Verfügung gestellt wurde (Armellini et al. 2021). Das Straßennetz der Stadt Braunschweig mit allen notwendigen Informationen wird darin vollständig abgebildet. Zudem ist eine kalibrierte Verkehrsnachfrage für einen durchschnittlichen Wochentag (24 Stunden) integriert.

Für die Implementierung des ViVre-Mobilitätsdienstes in das Braunschweig-Szenario, ist die Nutzung von virtuellen Haltestellen erforderlich. Da diese Haltepunkte im betrachteten Mobilitätskorridor nicht vorhanden waren, wurden mithilfe der in Harmann et al. (2022) vorgestellten Methoden mehr

als 4.000 virtuelle Haltestellen in das Straßennetz implementiert. Bei der Rastermethode (Grid) sind die Haltepunkte mit einem Abstand von 100m und für jeweils beide Fahrrichtungen in das Straßennetz integriert worden. Der zweite Ansatz nutzt die bereits bestehenden Standorte von Straßenlaternen (Streetlamps) als Zu- und Ausstiegspunkte und bei dem Kreuzungs-Ansatz (Intersection) werden mögliche virtuelle Haltestellen an jedem Kreuzungsarm eines Knotenpunktes implementiert. Die so identifizierten Standorte der virtuellen Haltestellen im Mobilitätskorridor sind in Abbildung 28, differenziert nach der jeweils genutzten Implementierungsmethode, dargestellt.

Innerhalb der SUMO-Simulation wurden die Anfragen für den Mobilitätsdienst automatisch und räumlich sowie zeitlich zufällig erstellt. Somit konnte sichergestellt werden, dass über das ganze Servicegebiet hinweg Personen erscheinen, die von den ViVre-Shuttles transportiert werden möchten. Den Personen wurde dabei immer die nächstgelegene virtuelle Haltestelle als Einstiegsort zugewiesen. Als Betrachtungszeitraum wurde die nachmittägliche Spitzenstunde gewählt.

Für die Disposition der ViVre-Shuttles wurde die von *Armellini (2021)* vorgestellte Routing-Funktion genutzt. Der darin hinterlegte Algorithmus versucht möglichst viele Anfragen für ein Fahrzeug zu bündeln. Dabei werden verschiedene, zuvor festgelegte Parameter bei der Disposition berücksichtigt. Zum einen wurde als die maximale Wartezeit für Personen ein Wert von 15 Minuten festgelegt. Nach Ablauf dieser Zeit, wird eine Anfrage abgelehnt und nicht mehr von den ViVre-Shuttles bedient. Des Weiteren wurde die Anzahl der Sitzplätze und damit die Kapazität des ViVre-Shuttles auf fünf Personen beschränkt.

Für die Simulationsstudie wurden insgesamt 1000 verschiedene Kombinationen aus der Anzahl von Personen-Anfragen und der Anzahl an verfügbaren ViVre-Shuttles untersucht. Bei allen Konfigurationen wurden die zuvor beschriebenen Rahmenbedingungen gleichermaßen berücksichtigt.



Abbildung 28: Virtuelle Haltestellen im Mobilitätskorridor, differenziert nach Implementierungsmethoden

- Bei der Gestaltung einer bedarfsgerechten Mobilitätslösung mit Bedienung virtueller Haltestellen müssen viele Aspekte berücksichtigt werden. Die Palette reicht von persönlichen Anforderungen, wie zumutbare Reise- und Wartezeiten, bis hin zu Auswirkungen auf den lokalen Verkehrsfluss. Im Rahmen der SUMO-Taskforce setzte sich AVL mit den Möglichkeiten der Bewertung

von neuen Mobilitätskonzepten, in diesem Falle der Nutzung eines On-Demand-Service, auseinander. Schwerpunktmäßig sollte dabei eine Plattform aufgebaut werden, die mithilfe von SUMO ein On-Demand-Service den konventionellen Fortbewegungsmitteln gegenüberstellen kann. Das Szenario, das für die Demonstration ausgewählt wurde, stellte die „letzte Meile“ dar: Eine bestimmte Anzahl von Personen, die am Braunschweiger Bahnhof ankommen und anschließend von dort aus zu ihren finalen Zielpunkten gelangen wollen.

Der Ablauf der Simulation startet mit einem Python-Skript, das aus den Nutzereingaben die Konfiguration für SUMO erstellt. Die Simulation nutzt außerdem die von IVS implementierten ViVre-Haltestellen sowie die von DLR erarbeitete Haltestellenbewertung, um aus mehreren möglichen virtuellen Haltestellen in der Nähe des Zielpunktes eine Auswahl zu treffen. Für die anschließende Routenberechnung (Abbildung 29) wird ein von AVL entwickelter Routenplaner, der auf einer EC2-Instanz in der AWS-Cloud läuft und über einen POST Request abrufbar ist, verwendet.

Diese Routine ist grundsätzlich in der Lage, drei verschiedene Fortbewegungsmethoden zu bewerten: Shuttle, Einzelfahrten (private PKWs) sowie ÖPNV. Aufgrund der lückenhaften ÖPNV-Informationen und teilweiser Inkonsistenz von Kartenmaterial war vorerst nur die Gegenüberstellung der beiden ersten Methoden möglich.

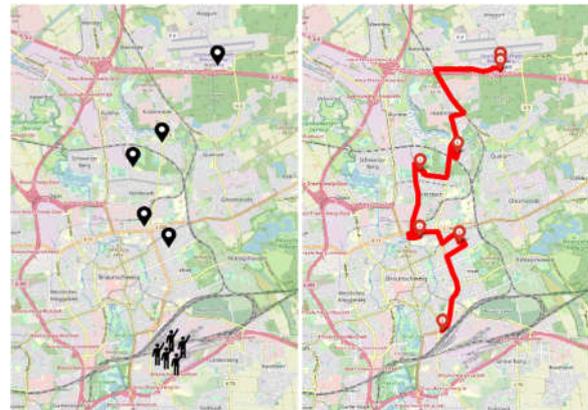


Abbildung 29: Nutzeranfragen (links) und Routenplanung für die ausgewählten Haltepunkte (rechts)

Folgende Ergebnisse (Abbildung 30) sind aus der Simulation der „letzten Meile“, bestehend aus 5 Personen, entstanden. Ein geeignetes Shuttle ist hier unmittelbar verfügbar. Bei den Metriken lag der Focus auf der zurückgelegten Strecke in Kilometern sowie der Tripdauer in Minuten aller Passagiere. Wie erwartet ist dem Ergebnis zu entnehmen, dass die Nutzung eines On-Demand-Services zwar die Tripdauer der einzelnen Personen verlängert, aber die gesamte gefahrene Distanz und somit die Belastung des Straßenverkehrs reduziert.

Bewertung Shuttleservice								
	Tripdauer	Gehdauer	Fahrdauer	Wartezeit	Tripdistanz	Gehdistanz	Fahrdistanz	Shuttle Tripdistanz
Person 1	10 min 49 sec	0 min 31 sec	10 min 2 sec	0 min 16 sec	3 km 3 m	0 km 49 m	2 km 954 m	14 km 221 m
Person 2	15 min 52 sec	0 min 40 sec	14 min 57 sec	0 min 14 sec	4 km 597 m	0 km 60 m	4 km 537 m	
Person 3	23 min 35 sec	1 min 06 sec	22 min 13 sec	0 min 15 sec	7 km 205 m	0 km 86 m	7 km 118 m	
Person 4	27 min 24 sec	0 min 24 sec	26 min 45 sec	0 min 14 sec	9 km 106 m	0 km 25 m	9 km 81 m	
Person 5	35 min 56 sec	0 min 37 sec	35 min 6 sec	0 min 13 sec	14 km 108 m	0 km 39 m	14 km 69 m	

Gegenüberstellung einzelne Fahrzeuge - Shuttle				Bewertung einzelne Fahrzeuge			
	Tripdauer	Tripdistanz	Tripdistanz Differenz		Tripdauer	Tripdistanz	Fahrzeugdistanz gesamt
Person 1	-3 min 1 sec	-0 km 216 m	+6 km 548 m	Person 1	7 min 48 sec	2 km 787 m	21 km 769 m
Person 2	-4 min 44 sec	-1 km 182 m		Person 2	11 min 8 sec	3 km 415 m	
Person 3	-22 min 45 sec	-6 km 996 m		Person 3	0 min 50 sec	0 km 209 m	
Person 4	-12 min 33 sec	-3 km 355 m		Person 4	14 min 51 sec	5 km 751 m	
Person 5	-13 min 33 sec	-5 km 477 m		Person 5	22 min 23 sec	9 km 631 m	

Abbildung 30: Ergebnisse der Simulation für „letzte Meile“-Szenario mit 5 Passagieren

Mit diesem kleinen Beispielszenario konnte die Funktionsweise der entwickelten Anwendung plausibilisiert werden. Der modulare Aufbau und Schnittstellen für externe Parametrisierung

ermöglichen flexible und vielfältige Simulationsabläufe. Die Routine kann unter anderem als Basis für folgende Fragestellungen genutzt werden:

- Dynamische Kombination aus Haltestellenbewertung mit der Disposition (Balance zwischen persönlichen und verkehrsrelevanten Aspekten).
- Untersuchung verschiedener Routenplanungsroutinen auf Plausibilität und Effizienz (Soll-Ist-Vergleich) für praxisrelevante Anwendungsfälle mit komplexen Randbedingungen.
- Auslegung des Ridepooling-Service je nach Beförderungsbedarf und Verkehrsaufkommen unter Nutzung der lokalen Verkehrsdaten.
- Langfristige Umgestaltung des ÖPNV-Angebots in Verbindung mit dem Ridepooling-Service zur verbesserten Bedarfsdeckung und gleichzeitiger Optimierung des Verkehrsaufkommens.

Das DLR beschäftigte sich mit der Bewertung von virtuellen Haltestellen. Je nach Position der Nutzeranfrage können mehrere naheliegende Haltepunkte als virtuelle Haltestellen für das automatisierte Shuttle infrage kommen. Es ist dann notwendig jede dieser möglichen Haltestellen zu analysieren um sie nach bestimmten zuvor definierten Kriterien zu bewerten um somit das Dispositionssystem bei der Auswahl der endgültigen virtuellen Haltestelle zu unterstützen. Eine freie Wahl des Halteorts bringt Risiken, dafür sollen unsere Untersuchungen ins Spiel kommen. Es wird nach einer Haltestelle gesucht, die den Umgebungsverkehr und deren Verkehrsfluss so wenig wie möglich beeinträchtigt, beim Halt des Shuttles geringere kritische Situationen erweist, und andere Bedingungen wie z.B. die Erreichbarkeit durch den Benutzer (kurzer Fußweg/Laufzeit) erfüllt.

Diese Analyse der potentiellen Haltestellen wird unmittelbar nach der Anfrage des Nutzers gestartet. Dazu simulieren wir einen Teil des Braunschweig Szenarios in der Open-Source-Software Eclipse SUMO. Das Simulationsszenario wird rund um die Nutzernachfrage (unser Interessensgebiet) geschnitten um Rechenaufwand (und somit Simulationszeit) zu reduzieren. Als erstes wird der Nullfall simuliert, das heißt, der Fall wo es kein Shuttle gibt. Dieser Fall gibt uns eine Referenz zum Vergleichen. Als nächstes werden die in diesem Gebiet möglichen Haltestellen aus einem vorhandenen Katalog übernommen, und für jede einzelne werden mehrere Simulationsdurchläufe ausgeführt bei der die Simulations-Seed variiert wird (um Zufälligkeit einzuführen für eine korrekte statistische Auswertung). Die in der Simulation analysierten Outputs waren die Zunahme an Kritische Situationen, der time loss (Zeitverlust) und die Dauer des Fußwegs. Als Kritische Situationen wird das Unterschreiten der Grenzwerte für PET (post encroachment time) und TGAP (time headway) bezeichnet. Beide Werte identifizieren Zeitintervalle, wobei PET auf Kreuzungen definiert wird und TGAP auf Kanten. Der gemessene Zeitverlust bezieht sich auf alle im Interessensgebiet befindenden Fahrzeuge, und so wird die Auswirkung des Shuttles und dessen Stopp auf den Verkehr erkennbar. Die Dauer des Fußwegs ist die Zeit die der Nutzer braucht um sich an jede Virtuelle Haltestelle zu begeben, und berücksichtigt unter anderem ggf. Kreuzungen an Fußgängerampeln. Die Ergebnisse dieser Simulationen dienen als Grundlage für die Entscheidung des Dispositionssystems, wo dieser letztendlich den Einfluss auf das Routing und weitere Nutzeranforderungen berücksichtigen muss.

#### *Absicherung des Echtzeitverhaltens der V2X-Kommunikation*

Für die praktische Erprobung und Evaluation der Methoden zur Absicherung und Echtzeitbehandlung wurde der Anwendungsfall „Virtueller Fußgängerüberweg“ ausgewählt. Der Schwerpunkt der Umsetzung lag auf der Umsetzung der Aktivität „Handle-VPC“ und der zugehörigen Subaktivitäten. Die Subaktivitäten auf der obersten Stufe umfassen die Einrichtung, Aufrechterhaltung und Auflösung eines virtuellen Fußgängerüberwegs und wurden bis zur untersten Stufe der Kommunikationsaktivitäten umgesetzt. Damit konnten die Sicherheitsanforderungen hinsichtlich der

Kommunikation zwischen dem automatisierten Fahrzeug (AF) und dem Verkehrsmanagementsystem (VMS) während der Vorbereitung und Aufrechterhaltung eines VPC evaluiert werden.

#### *Beschreibung des Anwendungsfalls und der Umsetzung im Demonstrator*

Das übergeordnete Sicherheitsziel des Anwendungsfalls „Virtueller Fußgängerüberweg“ besteht darin, dass zu keinem Zeitpunkt ein Fußgänger und ein automatisiertes Fahrzeug (AF) den virtuellen Fußgängerüberweg gleichzeitig überqueren. Nachdem das VMS eine Anforderung zur Einrichtung eines virtuellen Fußgängerüberwegs erhalten hat, werden sämtliche Fahrzeuge im relevanten Bereich über den Ort und Zeitpunkt der geplanten Einrichtung informiert. Der geplante Einrichtungszeitpunkt muss hinreichend weit vor dem ersten Absendezeitpunkt liegen, so dass die Information von jedem AF in der Umgebung empfangen und verarbeitet werden können. Zur Verarbeitung gehört die Entscheidung, ob das AF den kritischen Bereich um den Fußgängerüberweg entweder noch vor dem Einrichtungszeitpunkt überfahren und verlassen kann, oder rechtzeitig vor dem Überweg zum Stehen kommen kann. Der entsprechende Zeitraum wurde in der Echtzeituntersuchung abgeleitet. Mit dem Erreichen des Einrichtungszeitraums beginnt die Aufrechterhaltungsaktivität. Die zu Fuß gehende Person überquert den Überweg, und die automatisierten Fahrzeuge in der Umgebung werden periodisch von dem VMS informiert. Nachdem die Person die Überquerung abgeschlossen hat, sendet das VMS eine Auflösungsinformation an die umgebenden AFs.

Während der Echtzeitanalyse wurden zwei Kommunikationsszenarien betrachtet: die V2X-Kommunikation ohne Bestätigungsnachricht und die V2X-Kommunikation mit Bestätigungsnachricht. Die V2X-Kommunikation mit Bestätigungsnachricht wurde im Rahmen der Absicherung und Echtzeitanalyse als zusätzlich notwendige Sicherheitsebene abgeleitet, um evtl. Kommunikationsausfälle zuverlässig zu erkennen und zu behandeln. Der Demonstrator kann zwischen beiden Kommunikationsszenarien umgeschaltet werden und erlaubt durch einen physikalischen Eingriff ( „Ziehen“ eines Netzkabels) einen Kommunikationsausfall mit der V2X-Komponente zu demonstrieren.

#### *Aufbau des Demonstrators*

Die Grundlage für den Demonstrator bilden drei Simulationsrechner und zwei V2X-Kommunikationseinheiten („waveBEE plus“). Der Systemaufbau ist in Abbildung 31 dargestellt. Auf dem Simulationsrechner AF werden die Aktivitäten des automatisierten Fahrzeugs ausgeführt. Die SUMO-Instanz AF-Sicht dient zur Anzeige des Lagebilds aus der Sicht des automatisierten Fahrzeuges. Der Simulationsrechner AF kommuniziert über eine kabelgebundene LAN-Verbindung mit der V2X-Hardware. Auf dem Simulationsrechner VPC werden die Aktivitäten des Verkehrsmanagementsystems ausgeführt und die dortige SUMO-Instanz dient zur Anzeige des Lagebildes aus der Sicht des VMS. Der Simulationsrechner VPC kommuniziert ebenfalls mit einer V2X-Hardware über eine kabelgebundene LAN-Verbindung. Die Benutzerinteraktion mit dem Demonstrator findet auf dem Simulationsrechner GT (Ground Truth) statt. Zusätzlich wird das gemeinsame Lagebild in der dort ausgeführten SUMO-Instanz angezeigt.

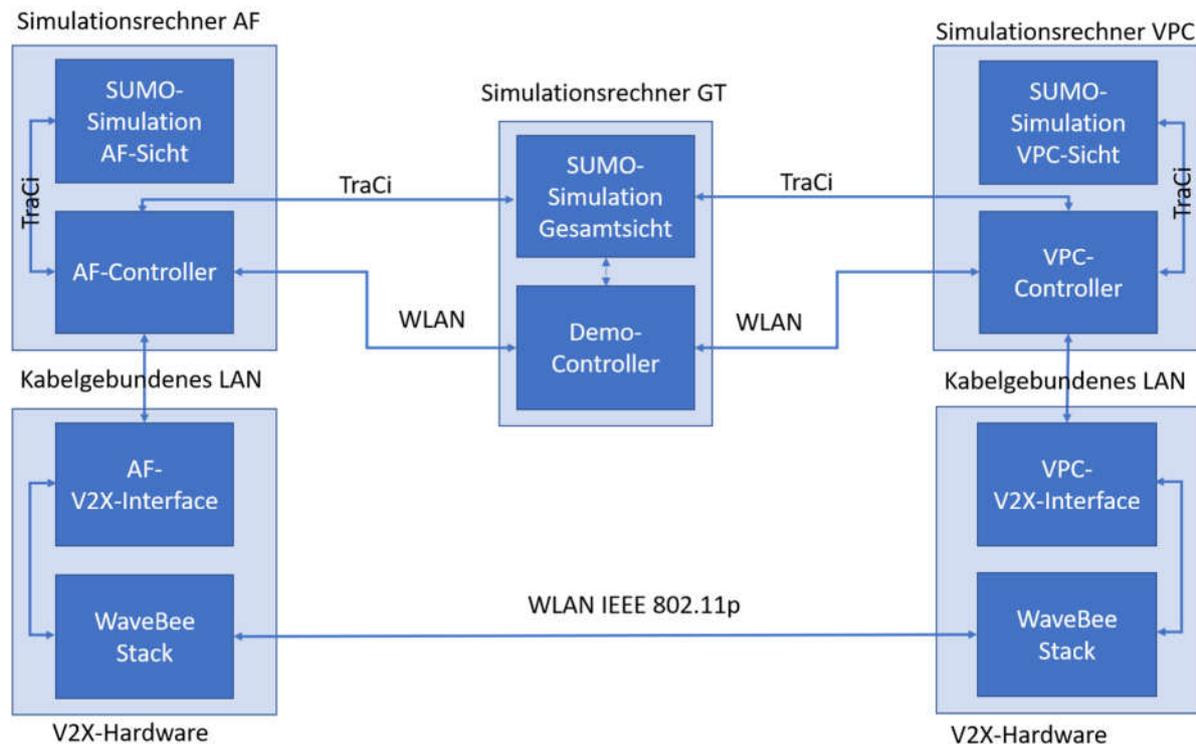


Abbildung 31: Systemübersicht Demonstrator

Alle drei Simulationsrechner befinden sich in einem gemeinsamen WLAN-Netzwerk. Über dieses WLAN findet einerseits die TraCi-Kommunikation zur Synchronisation der SUMO-Instanzen und der Austausch von Anzeigeinformationen statt, andererseits werden die notwendigen Daten zum Ablaufsteuerung des Demo-Controller übertragen.

Zwischen dem AF-Controller und dem VPC-Controller findet kein direkter Austausch von Informationen statt. Sämtliche durch die Aktivitätenmodellierung beschriebenen Kommunikationsvorgänge zwischen dem AF-Controller und dem VPC-Controller werden an die V2X-Hardware weitergeleitet, dort in Nachrichtentypen für die IEEE 802.11p-basierte V2X-Kommunikation umgesetzt und versendet. Ein Kommunikationsabbruch zwischen dem AF-Controller und dem VPC-Controller lässt sich somit durch eine Unterbrechung der kabelgebundenen LAN-Verbindung zwischen Simulationsrechner und zugehöriger V2X-Hardware simulieren.

### Controller-Architektur

Auf der Grundlage der Aktivitätenmodellierung wurden jeweils für AF und VPC ein Zustandsautomat aufgestellt und implementiert. Diese Implementierungen übernehmen zusätzlich die Ansteuerung der jeweiligen SUMO-Instanzen, die graphische Anzeige der internen Zustände und die Kommunikation mit der V2X-Hardware. Zusätzlich zu den aus der Aktivitätenmodellierung abgeleiteten Zustände wurden die Metazustände „Pause“ und „Terminierung“ eingeführt, die das Pausieren bzw. Beenden des Demonstratorlaufs erlauben. Die Synchronisation der Metazustände findet durch den „Demo-Controller“ statt, der auf dem Simulationsrechner GT läuft und Interaktionselement zur Demonstratorsteuerung anbietet.

Die folgende Liste beschreibt alle möglichen Zustände des AF-Zustandsautomaten:

- Pause: Die Simulation wird angehalten.

- **Terminate:** Die Simulation wird beendet und die Verbindung zur WaveBee wird getrennt.
- **Uninformed:** Das automatisierte Fahrzeug folgt seiner Route. Die Aufgabe der Fahrzeugsteuerung wird durch SUMO übernommen. Das Fahrzeug verfügt über keinerlei Informationen zu einem etwaigen virtuellen Fußgängerüberweg.
- **Informed:** Das automatisierte Fahrzeug folgt seiner Route. Die Aufgabe der Fahrzeugsteuerung wird durch SUMO übernommen. Das Fahrzeug bewertet laufend die aktuellsten Zustandsinformationen des VMS zur VPC. Das AF überprüft laufend den Anhalteweg und, falls der gemeldete Aktivierungszeitpunkt der VPC in der Zukunft liegt, schätzt das Fahrzeug die eigene Position zum Aktivierungszeitpunkt anhand der aktuellen Position und Geschwindigkeit ab.
- **Braking:** Das automatisierte Fahrzeug befindet sich in einem Bremsmanöver. Die eigentliche Durchführung des Bremsmanövers wird durch SUMO übernommen. Das Fahrzeug bewertet laufend die aktuellsten Zustandsinformationen des VMS zur VPC. Sobald die VPC seitens des VMS aufgehoben wurde, wird das Bremsmanöver zurückgenommen und in den Zustand uninformed gewechselt.

Die folgende Liste beschreibt alle möglichen Zustände des VPC-Zustandsautomaten:

- **Pause:** Die Simulation wird angehalten.
- **Terminate:** Die Simulation wird beendet und die Verbindung zur WaveBee wird getrennt.
- **Off:** Es liegt keine Anfrage für den Aufbau einer VPC vor. Der umliegende Verkehr wird entsprechend informiert, dass für eine unbestimmte Zeit keine Anfrage für eine VPC vorliegt.
- **Prepare:** Eine Anfrage für den Aufbau einer VPC liegt vor. Es werden regelmäßige Zustandsinformationen gesendet. Falls die Anfrage zurückgezogen wurde, wechselt der Zustandsautomat zurück in den Zustand Off. Dieser Zustand muss nach spätestens drei Sekunden verlassen werden. Dazu wurden zwei Varianten des Zustandsautomaten implementiert. Sollte sich die Demo im Modus ohne explizite Bestätigungsnachricht befinden, wird nach dem Ablauf von drei Sekunden in den Zustand Maintain gewechselt. Im Modus mit expliziter Bestätigung wird nach dem Ablauf von weiteren drei Sekunden der Modus Dissolve betreten, es sei denn, es wurde zwischenzeitlich eine Bestätigungsnachricht empfangen.
- **Dissolve:** Der umliegende Verkehr wird über die Aufhebung der VPC informiert. Nach dem Aussenden der Nachricht wechselt der Automat in den Zustand Off.

#### *Kommunikation mit der V2X-Hardware*

Zur Kommunikation mit der V2X-Hardware werden definierte Positionsdatenpakete, Phasendatenpakete und Bestätigungspakete ausgetauscht. Die Positionsdatenpakete enthalten Angaben zur gegenwärtigen Position des AF und die Phasendatenpakete enthalten Angaben über den gegenwärtigen Zustand des virtuellen Fußgängerüberwegs, seine Dauer und den kommenden Zustand der VPC und seiner Dauer. Ein Bestätigungspaket ist im Wesentlichen ein speziell gekennzeichnetes Phasendatenpaket.

Die Positionsdatenpakete werden vom AF-Controller an die V2X-Hardware gesendet, dort in standardkonforme V2X-Pakete umgesetzt, übertragen und dann vom VPC-Controller empfangen.

Die Phasendaten werden vom VPC-Controller an die V2X-Hardware gesendet, dort in standardkonforme V2X-Pakete umgesetzt, übertragen und dann vom AF-Controller empfangen.

Die Bestätigungsdaten werden vom AF zurück an die VPC verschickt und dienen der Bestätigung der empfangenen Phasendaten. Zur Bestätigung wird das Bestätigungsdatenpaket mit einer Kopie der empfangenen Phasendaten befüllt.

#### *V2X-Datenaustausch zwischen den waveBEE-Kommunikationseinheiten*

Der Datenaustausch zwischen den Simulationsrechnern erfolgt über zwei „waveBEE plus“-Geräte. Die „waveBEE Stack“-Architektur der waveBEE-Kommunikationseinheiten übernimmt standardkonformes Senden und Empfangen von V2X-Nachrichten. Das Wave Data Service (WDS) Layer ermöglicht die Kommunikation von Benutzerapplikationen mit dem Stack. Somit werden standardkonforme Nachrichten des Typs „Cooperative Awareness Message“ (CAM) zur Übertragung der Position, Geschwindigkeit und Orientierung des AF und Nachrichten des Typs „Signal Phase And Timing“ (SPAT) zur Übertragung von Phase und Timing des VPC verwendet.

#### *V2X-Umsetzung auf den Steuergeräten*

Die auf den waveBee-Steuergeräten laufende V2X-Interface-Applikation erstellt zunächst eine TCP/IP-Verbindung zu dem angeschlossenen Simulationsrechner. Daraufhin wird ein Wave Data Client zur Kommunikation mit dem waveBEE-Stack über den WDS kreiert. Abhängig von den beim Starten der Applikation angegebenen Kommandozeilenparametern werden bestimmte V2X-Nachrichtentypen über den WDS abonniert, entweder CAM oder SPAT, sodass nach einem vom Stack automatisch durchgeführten Empfang einer solchen Nachricht dessen Daten über die TCP/IP Verbindung an den Simulationsrechner gesendet wird. Zeitgleich mit diesem Ablauf werden die von dem Rechner gelieferten Simulationsdaten in Datenformate des waveBEE-Stacks konvertiert und über den WDS an diesen gesendet, welcher daraus automatisch die jeweiligen CAM oder SPAT Nachrichten generiert und absendet. Durch dieses Senden und Empfangen wird die Kommunikation der Simulationsrechner miteinander über V2X Nachrichten ermöglicht.

#### *Synchronisation der Simulationen via TraCI*

Der AF-Controller und der VPC-Controller kommunizieren mittels TraCI sowohl mit einer lokalen SUMO-Simulation als auch mit der SUMO-Simulation für die Gesamtsicht. Über die TraCI-Schnittstelle werden sämtliche simulationsrelevante Daten übertragen. Wichtig ist dabei, dass zwar beide Controller ihre Daten an die Gesamtsicht senden, von dort aber keine Daten empfangen, sodass der Informationsaustausch über das Verkehrsgeschehen über die V2X-Hardware erfolgen muss.

#### *Entscheidungsfindung durch den AF-Controller*

Der AF-Controller muss anhand der übertragenen Phasendaten entscheiden,

1. ob ein Überfahren der VPC noch vor der Aktivierung möglich ist,
2. ob ein Bremsmanöver vor der VPC durchzuführen ist, oder
3. ob die Fahrt unverändert fortgesetzt werden kann.

Dazu werden folgende Größen betrachtet und bestimmt:

- Breite der VPC von 4 m, die gewünschte Haltelinie befindet sich 1 m vor der VPC
- aktuelle Distanz  $d$  zur VPC
- Prognose über die bis zum Aktivierungszeitpunkt der VPC zurückgelegte Strecke  $d_{active}$ , die Prognose basiert auf der Annahme der Beibehaltung der aktuellen Geschwindigkeit
- Anhalteweg  $d_{brake}$

In dem Fall, dass die VPC noch nicht aktiviert wurde, werden die Distanzen  $d$  und  $d_{active}$  verglichen. Solange  $d_{active} > d + 4$  gilt, wird die Fahrt unvermindert fortgesetzt, da das AF voraussichtlich die VPC schon überfahren hat, bevor sie aktiviert wird. Andernfalls werden die Distanzen  $d$  und  $d_{brake}$  miteinander verglichen. Sobald  $d_{brake} \geq d - 1$  gilt, wird ein Bremsmanöver eingeleitet, da in diesem Fall der Anhalteweg geringer als die Distanz zur VPC ist.

#### *Evaluation des Demonstrators*

Die Ergebnisse der Echtzeit- und Sicherheitsanalyse konnten am Demonstrator bestätigt werden. Ohne den Sicherheitsmechanismus einer Bestätigungsnachricht konnten im Simulator kritische Szenarien nachgestellt werden. Durch einen Ausfall der Kommunikation konnten gezielt Situationen erzeugt werden, in denen das AF die VPC während der Aktivierung überfuhr und somit potentiellen Unfällen in der Realität entspricht. Ebenso konnte demonstriert werden, dass der in AP5 abgeleitete Sicherheitsmechanismus einer gesonderten Bestätigungsnachricht solche kritischen Situationen effektiv verhindert. Solange der Sicherheitsmechanismus aktiviert war oder die Kommunikation ungestört verlief, konnten keine kritischen Situation erzeugt oder beobachtet werden.

Darüber hinaus konnten die in AP5 zugrunde gelegten Echtzeitschranken bestätigt werden. Es konnten keine Verletzungen der abgeleiteten bzw. abgeschätzten Zeitschranken für die Kommunikationsdauern festgestellt werden. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die angesetzte Vorwarnzeit von 3 s vor der Aktivierung des virtuellen Fußgängerüberwegs ausreichend ist.

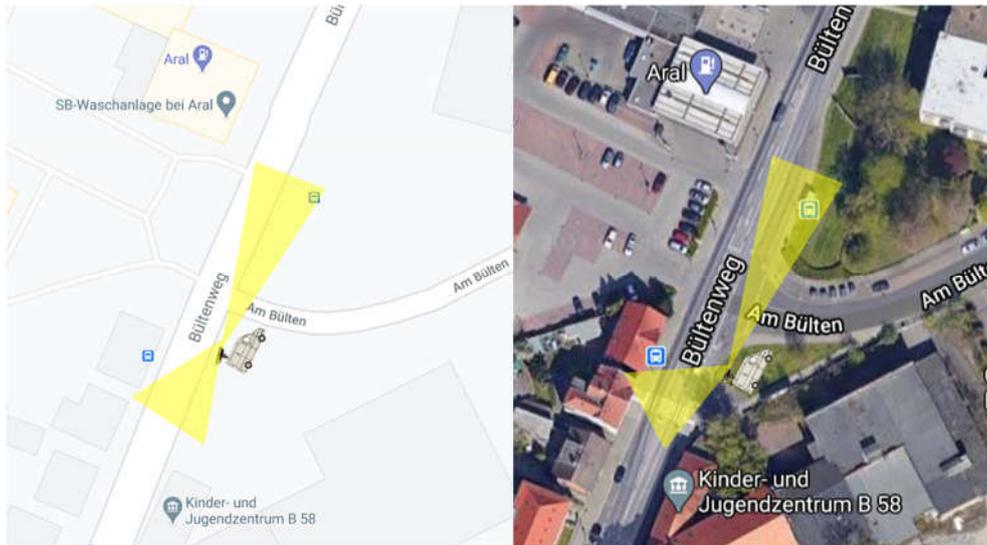
#### **Bewertung, Nutzerakzeptanz und verkehrsrechtliche Begleitforschung**

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse aus einer Messkampagne zur Bewertung der Verkehrssicherheit und -effizienz sowie Studien zur Nutzerakzeptanz zusammen. Im Rahmen der Untersuchung der Nutzerakzeptanz wurde sowohl eine Realfahrtstudie als auch eine Online-Befragung durchgeführt. Abschließend wird in diesem Kapitel die Vorgehensweise hinsichtlich der verkehrsrechtlichen Begleitforschung beschrieben.

#### ***Messkampagne zur Bewertung der Verkehrssicherheit und -effizienz***

Im Rahmen einer Messkampagne, die vom 20.07.2021 – 21.07.2021, jeweils von 08:00 bis 17:00 Uhr im Projekt ViVre stattfand, wurde die empirischen Grundlage für das räumlich-zeitliche Interaktionsverhalten von Verkehrsteilnehmenden an einer virtuellen Haltestelle geschaffen.

Die während der Messkampagne untersuchte virtuelle Haltestelle, am Knotenpunkt Bültenweg / Am Bülten, befand sich im Bereich der Bushaltestelle „Am Bülten“ Richtung Norden. Das Messfahrzeug UTRaCar stand auf einer Grünfläche vor dem Kinder- und Jugendzentrum B58 (Abbildung 32) und erfasste mit zwei Kameras, die an einem 12m hohem Teleskopmast befestigt waren (Abbildung 33), den Bereich der virtuellen Haltestelle sowie den Zebrastreifen.



**Abbildung 32: Standort des Messfahrzeugs (UTRaCar) auf der Grünfläche Ecke Bülteweg / Am Bülten, Braunschweig [Google]**

Zeitgleich zu der Messkampagne fand eine Probandenstudie statt. Im Fokus der Untersuchung standen die Interaktionen des Shuttles mit anderen Verkehrsteilnehmern, sowie die Interaktion der Probanden mit anderen Verkehrsteilnehmern. Das Shuttle näherte sich dabei der virtuellen Haltestelle und hielt an dieser an. Die Probanden stiegen zu und danach verließ das Shuttle die virtuelle Haltestelle wieder.

Die Messkampagne diente als Grundlage zur Untersuchung von Interaktionen der Probanden mit anderen Verkehrsteilnehmenden (zu Fuß Gehenden, Radfahrenden, E-Tretroller-Nutzenden) auf dem getrennten Fuß- und Radweg, sowie querender Probanden mit dem motorisierten Verkehr. Außerdem sollte das Einfahren und Verlassen der virtuellen Haltestelle und die mögliche Interaktion des Shuttles mit dem fließenden nachfolgenden Verkehr betrachtet werden (z. B. wartende oder überholende Kfz).



**Abbildung 33: Messfahrzeug (UTRaCar) auf der Grünfläche Ecke Bülteweg / Am Bülten, Braunschweig am 20.07.201 im Projekt ViVre**

Die aus der Kameraaufzeichnung entstandenen Videoaufnahmen (Abbildung 34 links) werden in einer Nachbearbeitung zu klassifizierten Objekthypothesen (vgl. Abbildung 34 rechts) und schlussendlich Trajektorien prozessiert. Diese erzeugten Trajektorien stellen die Grundlage für die Ableitung von verkehrsablaufbezogenen mikroskopischen und makroskopischen Kenngrößen dar.

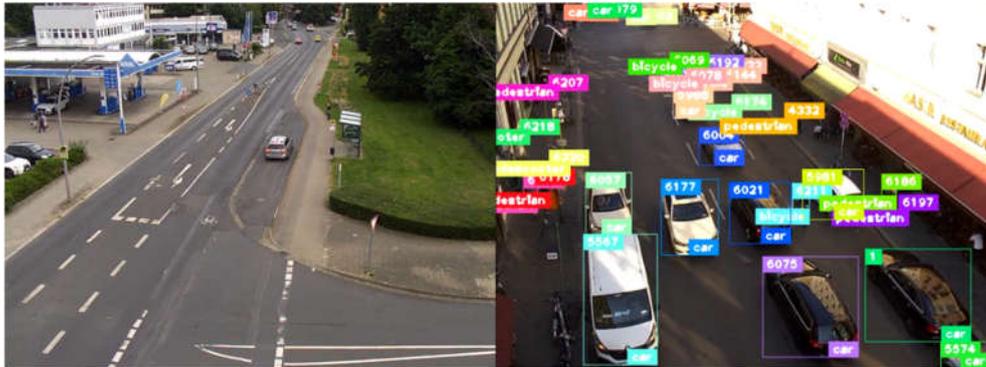


Abbildung 34: (links) Kamerastandbild der Virtuellen Haltestelle im Projekt ViVre am 21.07.2021, Shuttle in der Haltebucht und Proband auf dem Fußweg. (rechts) Nachbearbeitetes Videomaterial aus einem anderen Projekt

Zur Bewertung der virtuellen Haltestelle sollte zum einen der Einfluss auf den fließenden Verkehr berücksichtigt werden und zum anderen die Beeinflussung der virtuellen Haltestelle auf den nichtmotorisierten Verkehr. Während der Messkampagne wurden 8 Shuttlestopps und 65 Bushalte in der Bushaltebucht detektiert, sowie 83 Bushalte auf der gegenüberliegenden Bushaltestelle auf der Fahrbahn analysiert. Außerdem konnte das Verhalten der Probanden beim Aussteigen und Queren der Straße über Videoannotation ausgewertet werden.

#### *Vergleich von Shuttle und Bus*

Das Shuttle stellt mit 8 Fahrten eine verhältnismäßig kleine Stichprobe dar. Dennoch zeigte sich beim Fahren in die Bushaltebucht, dass die Geschwindigkeiten von Shuttle und Bus ähnlich niedrig, bei Werten um 2,5 m/s, lagen. Ein Busstopp dauerte im Durchschnitt 18 s, hingegen lagen die Stopps des Shuttles im Durchschnitt bei über 30 s.

Bei der Wahl einer virtuellen Haltestelle in einer Bushaltebucht sollte beachtet werden, dass diese lang genug ist, damit Shuttle und Bus Platz zum Halten finden, sodass das Shuttle in der Bushaltebucht nicht den ÖPNV behindert.

#### *Probandenverhalten*

Sowohl der Ausstiegs- als auch der Einstiegsprozess konnte über die Kameras beobachtet werden. Beim Aussteigen querten 50% der 8 Probanden die Fahrbahn hinter dem Shuttle und benötigten im Mittel 7 s zum Queren. Im Bereich der Bushaltebucht warteten 50% der Probanden an der Rasenkante und 25% an der Grenze zum Radweg auf das Shuttle. 63% der Probanden querten den Radweg bereits, bevor das Shuttle angehalten hat.

Sowohl das dichte Halten am Radweg, als auch das frühzeitige Queren dieses kann Interaktionen zwischen Zu-Fuß-Gehenden und Radfahrenden fördern. Bei hochfrequentierten Strecken sollten aus- und einsteigende Passagiere nicht den Radweg queren müssen um Interaktionen mit dem Radverkehr zu vermeiden.

### *Lage der Virtuellen Haltestelle auf der Fahrbahn oder in einer Bushaltebucht*

Im Kamerabereich lag die virtuelle Haltestelle in einer Bushaltebucht. Auf der gegenüberliegenden Fahrbahnseite, vor dem Zebrastreifen gibt es ebenfalls eine Bushaltestelle. Diese ist im Video nicht zu erkennen, allerdings konnte der Rückstau analysiert werden. In 67% aller Bushalte (n= 83) wurden ein oder mehr Fahrzeuge hinter dem Bus, durch den Busstopp beeinflusst, d.h. dass Fahrzeuge hinter dem Bus bremsen oder anhalten mussten. Im Mittel wurden 3,1 Fahrzeuge und bis zu 10 Fahrzeuge bei einem Bushalt auf der Fahrbahn beeinflusst.

Bei weniger befahrenen Straßen könnte eine virtuelle Haltestelle auf der Fahrbahn durchaus möglich sein. In anderen Fällen führt eine virtuelle Haltestelle auf der Fahrbahn zu stockendem Verkehr oder auch Stau, sowie einem langsameren Durchfluss der Verkehrsteilnehmenden. Liegt die virtuelle Haltestelle in einer Bushaltebucht wird der fließende Verkehr weniger beeinflusst, als bei einer virtuellen Haltestelle auf der Fahrbahn.

Während der Messkampagne gab es 65 Bushalte und 8 Shuttlestopps in der Bushaltebucht. Dabei kam es selten zu Begegnungen mit dem fließenden Verkehr, in 3 Fällen musste der Bus trotz aktivem Blinker bremsen, um den fließenden Verkehr vorbei zu lassen.

### *Interaktionen mit dem nichtmotorisierten Verkehr*

Während der 8 Shuttlestopps kam es zu keiner Begegnung mit nichtmotorisiertem Verkehr. Bei den 65 Bushalten in der Bushaltebucht stiegen 85 Passagiere aus und 30 Passagiere zu, dabei kam es zu 16 Begegnungen und Interaktionen. In 12 Fällen wichen Radfahrende Richtung Norden frühzeitig auf den Gehweg aus, um aussteigenden Passagieren Platz zu gewähren. In lediglich 4 Fällen mussten Radfahrende abbremsen, da Passagiere nicht schnell genug den Radweg räumten oder Radfahrende auf den Fußweg auswichen und Passagiere sehr schnell auf den Fußweg rannten.

### *Realfahrtstudie zu Nutzerakzeptanz und Wirkung*

Im Juli 2021 wurde das in Vivre entwickelte Gesamtsystem im Rahmen einer Nutzerstudie bewertet. Hierbei erlebten 41 ProbandInnen eine Reise vom DLR zu einem vorgegeben Ziel (Am Bünten, Braunschweig) und wieder zurück. Die Reise bestand aus einem Fußweg zur virtuellen Haltestelle (Abbildung 35, links), einer Fahrt mit einem Wizard-Of-Oz automatisierten Shuttle (Abbildung 35, Mitte und rechts) und einem Fußweg zum Reiseziel. Die gleiche Reise wurde auch als Rückfahrt erlebt. Hier kam es zu zwei geplanten Störfällen: zuerst hielt das Shuttle eine Minute am Straßenrand, später kam es zu einer Routenabweichung. Eine Hälfte der ProbandInnen erhielt zu diesen zwei Störfällen nähergehende Information, die andere Hälfte nur eine Warnung. Die gesamte Reise dauerte ca. eine Stunde.

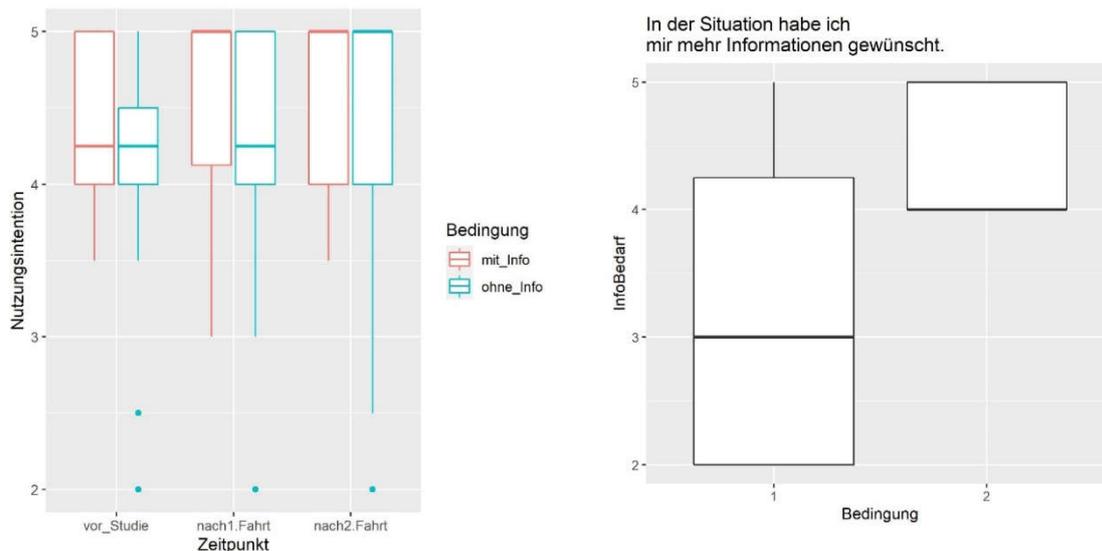
Das Erleben der Reisenden wurde anhand fünf verschiedener Maße aufgezeichnet. Dies waren Fragebögen vor der Reise, nach der Hinfahrt und nach der Rückfahrt; eine kontinuierliche subjektive Bewertung anhand eines Sliders in der Navigationsapp; physiologische Daten gemessen anhand eines



Abbildung 35: Probandin während Fußweg (links), während der Fahrt (Mitte) und automatisiertes Fahrzeug (rechts).

Elektrokardiographie-Sensors und zweier Hautleitfähigkeitssensoren; und einer Kamera, welche im Auto das Gesicht des Probanden aufzeichnete. Diese Maße können dem System in Zukunft Rückmeldung über das momentane Reiseerleben der ProbandInnen geben. Dementsprechend ist es möglich, das System nutzeradaptiv zu gestalten, indem individuell angepasste Informationsinhalte vermittelt werden. Dies kann sowohl in der ViVre-App, als auch auf einem Display im Fahrzeug geschehen.

Erste Ergebnisse der Fragebogendaten weisen darauf hin, dass die Akzeptanz des Gesamtsystems, gemessen durch Nutzungsintention, sowohl nach der ersten als auch der zweiten Fahrt in beiden Informationsgruppen steigt (siehe Abbildung 36).



**Abbildung 36: links: Akzeptanz gemessen anhand von Nutzungsintention zu drei Messzeitpunkten. Rechts: Informationsbedarf der zwei Gruppen mit und ohne Information im Störfall.**

Das heißt, dass die beiden Störfälle auf der zweiten Fahrt die Akzeptanz des Shuttles nicht beeinträchtigten. Dies verhielt sich für die Gruppe, welche nähere Information zu den Ursachen der Störfälle erhielt, und der Gruppe, welche nur eine Warnung erhielt, gleich (siehe Vergleich T1 und T3 in Abbildung 36). Das verwendete Modell für Nutzungsintention, UTAUT2, konnte bestätigt werden. Es sagte anhand der Prädiktoren ‚Leistungserwartung‘, ‚sozialer Einfluss‘, ‚Unterstützende Bedingungen‘, ‚hedonische Motivation‘, sowie ‚wahrgenommenes Risiko‘ die Varianz in Nutzungsintention zu  $R^2 = 61,5\%$  voraus. Die Gruppe, welche nur eine Warnung erhielt und keine Information, bewertete deutlich höher, sich zu dem Zeitpunkt mehr Informationen gewünscht zu haben (Abbildung 36).

### Online-Akzeptanzbefragungen

Der Fokus der Akzeptanzbefragungen lag jeweils auf der Evaluation des gesamten Mobilitätskonzepts eines bedarfsorientierten, autonom fahrenden Shuttle-Service mit flexiblen Haltepunkten. Zur Erfassung der Nutzerakzeptanz wurden drei methodische Ansätze verwendet:

1. Qualitativ: offene, ungestützte Nennung von Nutzungsanforderungen, treibenden und hemmenden Einflussfaktoren (offene Assoziationen)
2. Quantitativ: gestützte Abfrage von treibenden und hemmenden Einflussfaktoren und Analyse der jeweiligen Einflussstärke auf die Nutzungsintention im Rahmen eines Treiber-Barrieren-Modells

3. Deskriptiv: auf Basis eines realen Fahrerlebens (vgl. Nutzerstudie) erfolgte eine deskriptive Evaluation und Fahrtbewertung anhand vordefinierter Kriterien (gestützte Abfrage)  
Die folgende (Sub-)Strukturierung des Kapitels orientiert sich an diesen drei methodischen Ansätzen.

### *Offene Assoziationen (qualitativ)*

Ziele bzw. Leitfragestellungen dieser qualitativen Erhebung sind folgende:

1. Welche Anforderungen stellen die Nutzer an ein derartiges Mobilitätskonzept?
2. Exploratives Erfassen von nutzungstreibenden und –hemmenden Faktoren (vgl. Mehrwert und Risiko)
3. Exploratives Erfassen von aktiver Akzeptanz (als Nutzer) und passiver Akzeptanz (als Verkehrsteilnehmer im Mischverkehr)
4. Für welche potentiellen Nutzergruppen/Zielgruppen ist dieses Mobilitätskonzept attraktiv und in welchen Situationen?

### *Methodisches Vorgehen*

Zur explorativen Erforschung eines Themas eignen sich insbesondere qualitative Ansätze. Das Spektrum der Umsetzungsmethoden umfasst z.B. Interviews, Fokusgruppen etc. Aufgrund von Einschränkungen durch Maßnahmen zur Eindämmung der COVID-19-Pandemie (z.B. Kontaktbeschränkungen) im Erhebungsjahr 2020, wurde ein online-basierter Ansatz gewählt, indem die Befragten schriftlich und stichpunktartig offene Fragen beantworteten. Dieses (online-basierte) Vorgehen hat zudem noch folgende Vorteile:

- effizientes Erreichen und Befragen einer größeren Stichprobe (rekrutierungsökonomische Gründe) und
- Mobilitätskonzept als Befragungsgegenstand, zu dem ein Großteil spontane Assoziationen hat (daher Alternative zur Tiefenbefragung).
- → dadurch kann eine theoretische Sättigung mit einer Vielfalt von Antworten/Assoziationen erreicht werden

Ein Nachteil von dieser Erhebungsmethode ist hingegen, dass – anders als in (interaktiven) Interviewsituationen – das Stellen von Verständnisfragen nicht möglich ist.

Die Erhebung der offenen Assoziationen erfolgte nicht auf Ebene einzelner Use Cases (d.h. nicht spezifisch zur Planung einer Fahrt, zur Durchführung einer Fahrt, zur Bezahlung einer Fahrt usw.), sondern für den gesamten Service. Hintergrund dieses Vorgehens ist die Abstraktheit eines autonomen Mobilitätskonzepts für viele Befragte und dass davon ausgegangen wurde, dass die Erhebung von Anforderungen an z.B. den Buchungsprozess die Befragten überfordert (bzw. der Prozess sich an allgemeinen UI/UX-Richtlinien orientieren sollte).

### *Beschreibung des Erhebungsinstruments*

Der Aufbau der Online-Umfrage lässt sich in fünf Stufen unterteilen (vgl. Abbildung 37).

1) Allgemeine Mobilitätssituation (inkl. MIV- und ÖPNV-Nutzung)
2) Szenario zur Vorstellung von bedarfsorientierten, autonom fahrenden Shuttle-Services mit flexiblen Haltepunkten
3) Nutzungsbereitschaft und Einstellung zu Mobilitätsdienstleistung sowie Erhebung von Assoziationen (offene Fragen)
4) Einstellung zum automatisierten Fahren und Nutzung von Ridesplitting-Services
5) Abfrage soziodemografischer Segmentierungsvariablen

Abbildung 37: Aufbau der Online-Umfrage (offene Assoziationen)

Zu Beginn wurden Fragen zur allgemeinen Mobilitätssituation gestellt, welches u.a. die Nutzung des motorisierten Individualverkehrs (MIV), als auch die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel umfasste. Anschließend wurden die Befragten gebeten, sich in ein bestimmtes Szenario hineinzusetzen, auf das sich die drauffolgenden Fragen beziehen würden. Dieses Szenario diente der Vorstellung des Konzepts von bedarfsorientierten, autonom fahrenden Shuttle-Services mit flexiblen Haltestellen und wurde sowohl im Rahmen eines kurzen Textes beschrieben, als auch mit dem in Abbildung 38 dargestellten Bild untermauert. Das Mobilitätskonzept wurde eher rudimentär skizziert, d.h., es erfolgte primär eine Beschreibung der Basisfunktionalität. Daraufhin folgten die Erfassung der Nutzungsbereitschaft und der Einstellung zu dieser Mobilitätsdienstleistung sowie die offenen Fragen (offene Assoziationen). Die untersuchte Mobilitätsdienstleistung lässt sich konzeptionell einordnen als (gepooltes) Ridesourcing/-hailing (z.B. Uber, Lyft) oder als Ridesplitting<sup>6</sup> (vgl. z.B. Shaheen & Chan, 2016, S. 574, 581 f. für einen Überblick zu geteilten Mobilitätsformen), wobei sich das Fahrzeug autonom fortbewegt. Das Ziel des vierten Fragenblocks der Umfrage war es, die Einstellung der Befragten zu den beiden Bestandteilen „Ridesplitting“ und „autonomes Fahren“ separat voneinander zu erfassen. Den Abschluss der Befragung stellte die Erfassung soziodemografischer Variablen dar.

Zudem wurden an zwei Stellen Maßnahmen zur Sicherung der Datenqualität eingefügt. Dies umfasste zum einen eine Form der „Aufmerksamkeitskontrollfrage“ („Dies ist eine Kontrollfrage. Bitte beantworten Sie die Frage mit ‚trifft völlig zu‘.“). Durch diese Maßnahme können Personen identifiziert werden, die sich lediglich durch den Fragebogen „durchklickten“. Zum anderen wurden die Teilnehmer nach dem Szenario gefragt, ob sie sich das Szenario genau durchgelesen haben und falls nicht, aus welchem Grund (z.B. technische Probleme bei der Anzeige).

Bitte versetzen Sie sich nun in folgende Situation:

Sie haben gehört, dass in Ihrer Region zukünftig **bedarfsorientierte Shuttle-Services** eingesetzt werden sollen. Dieser Shuttle-Service kann über eine App gebucht werden und hat zwei Besonderheiten:

- die Shuttle-Fahrzeuge fahren jeweils **autonom** (d.h. das Shuttle-Fahrzeug fährt selbständig und ohne Fahrer) und
- der **Zu- und Ausstieg** kann sowohl an klassischen Haltestellen als auch an sogenannten **virtuellen Haltestellen** erfolgen (d.h. zwischen z.B. Bushaltestellen gibt es weitere flexible Haltepunkte, die in der App markiert sind).

Ein **Pooling-Algorithmus** in der App sorgt dafür, dass Nutzer mit **ähnlichen Routen und Abfahrtszeiten gebündelt** werden.



Abbildung 38: Szenario (offene Assoziationen) - Quelle: Chesky/Shutterstock.com für das Bild; eigener Text

<sup>6</sup> Ridesplitting bezeichnet eine „[...] variation on ridesourcing: it involves splitting a ride and fare with someone else taking a similar route.“ (Shaheen & Chan, 2016, S. 582).

## Ergebnisse

### Betrachtung der Datengrundlage

Die Datenerhebung erfolgte mit Hilfe eines Online-Panel-Providers, um eine nach Alter (13-93 Jahre), Geschlecht und Bevölkerungsverteilung (nach Bundesland) repräsentative Stichprobe befragen zu können.

Eingeladen wurden Personen ab mindestens 13 Jahren, da davon ausgegangen wurde, dass diese Altersgruppe (noch kein Führerschein vorhanden) eine relevante Zielgruppe für diesen Mobilitätsdienst darstellen könnte und auch eine eigenständigere Mobilitätsplanung in dieser Altersgruppe stattfindet bzw. die selbstständige Nutzung des Shuttles möglich ist. Es wurden keine weiteren Teilnahmeanforderungen definiert.

Insgesamt nahmen 277 Befragte an der Umfrage teil. Die Teilnahme war über einen Zeitraum von einer Woche möglich (04.05. bis 11.05.2020).

Der Altersdurchschnitt der Befragten lag bei 50 Jahren ( $M = 50,47$  Jahre;  $SA = 16,695$ ). Es nahmen 52,7 % weibliche und 47,3 % männliche Befragte teil. Ca. 39 % stammten aus Orten mit weniger als 20 000 Einwohnern (d.h. eher ländlich) und 61 % aus eher städtischen Bereichen ( $\geq 20 000$  Einwohner). Dem Großteil der Befragten (83 %) steht ein Auto zur Verfügung (als Besitzer oder zur Mitnutzung). Da der Mobilitätsservice über eine Smartphone-Applikation bedient werden soll, wurde zudem auch der Smartphone-Besitz abgefragt, welcher bei 87 % lag.

### Vorgehen bei der Auswertung

Im Rahmen des Auswertungsvorgehens wurden die einzelnen Antworten der Befragten Kategorien zugeordnet. Dabei wurden die von den Befragten eingegebenen Antworten als Zitate unverändert übernommen, d.h. auch die (z.T. nicht korrekte) Rechtschreibung wurde übernommen, wobei jedoch eine entsprechende Kennzeichnung („[sic!]“) erfolgte. Wurden mehrere Aspekte in einer Aussage genannt, wurde die Aussage auf mehrere Kategorien aufgeteilt. Unverständliche Aussagen oder Antworten wie ‚keine Ahnung‘ wurden einer separaten Kategorie zugeordnet, welche aufgrund der fehlenden inhaltlichen Relevanz nicht weiter berücksichtigt wurde. Die offenen Fragen werden auf folgendem Schaubild zusammengefasst (Abbildung 39).

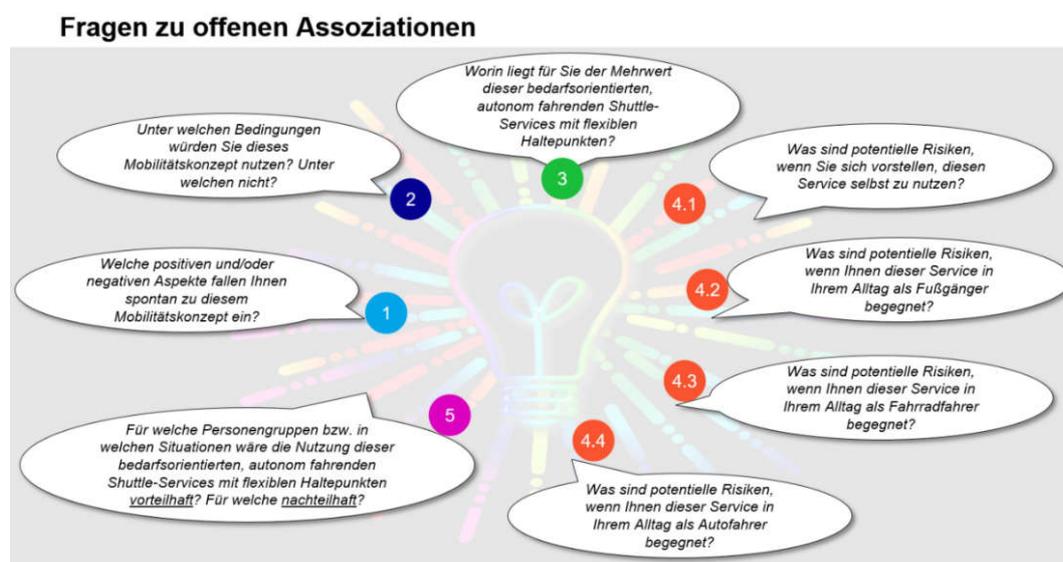


Abbildung 39: Überblick über die Fragen zu den offenen Assoziationen

**„Eisbrecherfrage“ (Frage 1)** („Welche positiven und/oder negativen Aspekte fallen Ihnen spontan zu diesem Mobilitätskonzept ein?“)

Diese erste Frage diente als leichte Einstiegs- bzw. „Eisbrecher“-Frage und sollte die Befragten dazu animieren, die ersten, spontanen Gedanken zu dem im Szenario vorgestellten Mobilitätskonzept zu nennen.

Die einzelnen Aussagen der Befragten wurden zu inhaltlich ähnlichen Kategorien zusammengefasst. Diese Kategorien wiederum wurden pro Frage zu übergeordneten Clustern gruppiert, welche als orange Ovale in Abbildung 40 dargestellt sind (für Frage 1). Beispielzitate für jede Kategorie befinden sich in einer PowerPoint-Präsentation.



Abbildung 40: Frage 1 („Eisbrecherfrage“) – Übersicht über die genannten Kategorien

Ein Cluster wurde zusammengefasst als **zeitliche Aspekte**. Am häufigsten ( $n = 106$  Nennungen) wurden Aussagen zu dem Aspekt ‚Flexibilität & Bedarfsorientierung‘ genannt (in Abbildung 5-7 durch die goldene Medaille gekennzeichnet). Weitere dem Cluster zugeordnete Kategorien waren,

- eine potentielle Abhängigkeit bzw. Inflexibilität durch u.a. die Vorausbuchung des Mobilitätsservice ( $n = 21$ ),
- Bedenken im Hinblick auf Verfügbarkeitsprobleme ( $n = 4$ ),
- sowohl potentielle Zeitvorteile ( $n = 6$ ), aber auch Zeitnachteile durch eine mögliche Unzuverlässigkeit des Service (z.B. durch Umwege) ( $n = 10$ ).

Das zweite Cluster umfasst allgemeine Einstellungen und Bedenken zum automatisierten Shuttle (benannt als ‚**zum Konzept an sich...**‘). Zum einen wurden Sicherheitsbedenken aufgrund der Fahrerlosigkeit genannt (stellt mit 51 Nennungen die bei dieser Frage am zweithäufigsten genannte Kategorie dar). Dieser Aspekt ist eng verwandt mit den drei Kategorien ‚Sicherheit und Hilfe im Bus‘ (da kein Fahrer als helfender Ansprechpartner vorhanden ist) ( $n = 10$ ), ‚allgemeines Misstrauen und Unsicherheit‘ ( $n = 12$ ) und ‚allgemein negative Einstellung zum Konzept und/oder autonomen Fahren an sich‘ ( $n = 21$ ). Konträr zu letzterer Kategorie gibt es auch Teilnehmer, die eine allgemein positive Einstellung hierzu haben (vgl. Kategorie ‚allgemein positive Einstellung zum Konzept und/oder autonomen Fahren an sich‘ mit  $n = 10$  Nennungen). Des Weiteren geben einige Teilnehmer an, dass sie für sich persönlich keinen Bedarf für diesen Mobilitätsservice sehen und generelle Zweifel an der

Umsetzbarkeit und Nützlichkeit des Konzepts haben ( $n = 14$ ). Zudem wurden Datenschutzaspekte und die Voraussetzung eines Smartphones genannt ( $n = 22$ ).

Das dritte Cluster umfasst Aussagen mit Bezug zum motorisierten Individualverkehr (MIV) oder zum öffentlichen (Nah-)Verkehr (ÖV) (**MIV- oder ÖV-Bezug**), wie z.B. die Sorge eines Befragten, dass der ÖV kannibalisiert wird ( $n = 1$ ). Des Weiteren wurden allgemeine Vor- und Nachteile zum MIV und ÖV genannt ( $n = 15$  Aussagen) (vgl. spätere Auswertungen für Details).

Dem vierten Cluster werden die Kategorien zugeordnet, die sich allgemein auf das Vorhandensein bzw. das Fehlen eines **sonstigen Mehrwerts** beziehen. Die am dritthäufigsten genannte Kategorie umfasst sowohl potentielle Umweltvorteile als auch -nachteile, indem ein Teil der Befragten ( $n = 29$ ) weniger Verkehrsaufkommen erwartet, ein anderer (geringer) Teil ( $n = 2$ ) hingegen befürchtet ein steigendes Verkehrsaufkommen durch das Vorhandensein eines derartigen Konzepts (vgl. „Rebound-Effekte“). Weitere Kategorien bezogen sich auf die Innovativität des Konzepts („Innovatives Konzept, Zukunftsmusik“,  $n = 16$ ), die ‚Einfachheit, Bequemlichkeit‘ ( $n = 9$ ) sowie, dass es mehr (unerwünschte oder erwünschte) soziale Kontakte gibt ( $n = 4$ ). Ähnlich wie bei dem Umweltaspekt existieren hinsichtlich der Kosteneffizienz ebenfalls ambivalente Wahrnehmungen: einerseits schätzen einige Befragte das Konzept als teuer ein ( $n = 12$ ), andere sehen hingegen potentielle Kostenvorteile, da z.B. die Personalkosten für Fahrer eingespart werden ( $n = 12$ ).

**Nutzungsbedingungen (Frage 2.1)** („Unter welchen Bedingungen würden Sie dieses Mobilitätskonzept nutzen?“)

Frage 2.1 bezieht sich auf die Erfassung der Anforderungen bzw. Nutzungsbedingungen. In Abbildung 41 befindet sich eine Übersicht der zu dieser Frage genannten Kategorien und zu welchen Clustern diese subsummiert wurden.

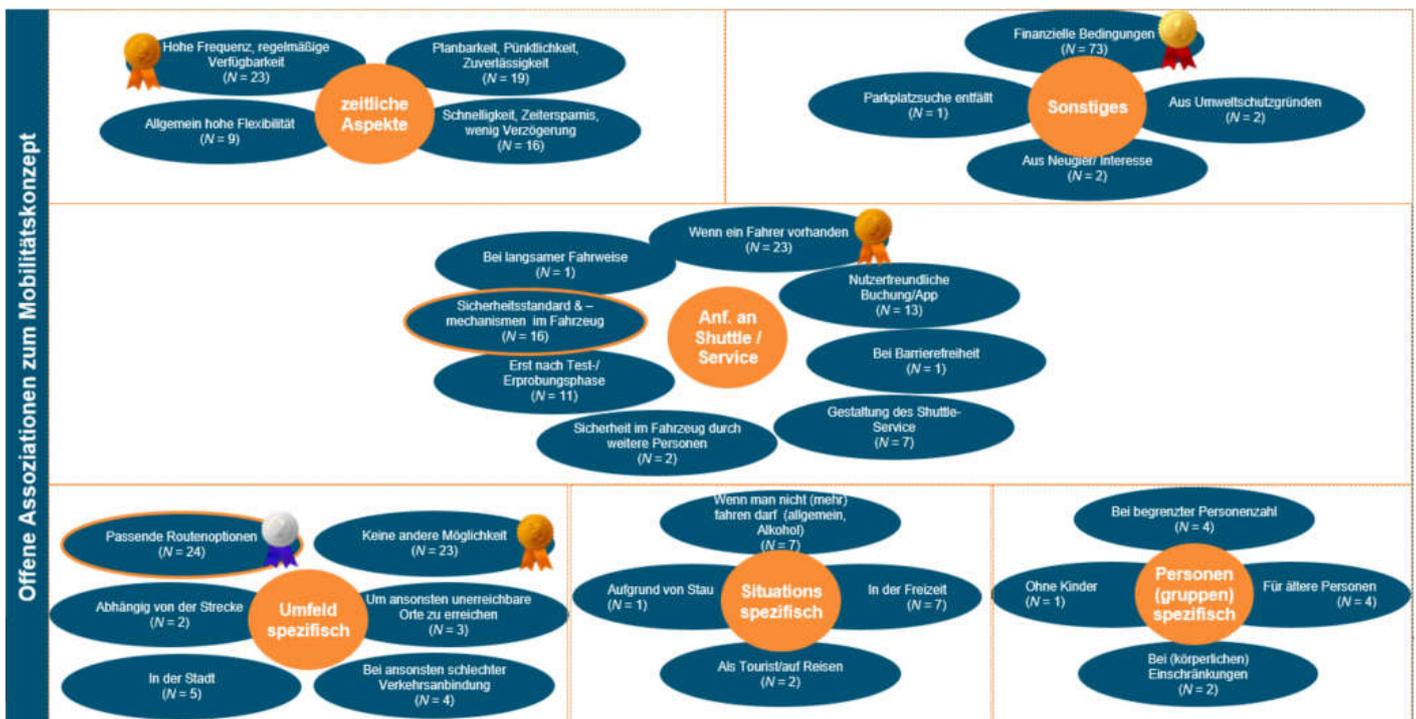


Abbildung 41: Frage 2.1 (Nutzungsbedingungen) – Übersicht über die genannten Kategorien

Ein Cluster bezieht sich auf **Nutzungsanforderungen mit zeitlichem Bezug**, wie z.B.,

- dass eine hohe Frequenz und regelmäßige Verfügbarkeit gegeben sein sollte ( $n = 23$  Nennungen),
- dass das Shuttle planbar, pünktlich und zuverlässig verkehren sollte ( $n = 19$ ) und
- dass der Nutzer von einer Zeitersparnis ( $n = 16$ ) und einer hohen Flexibilität ( $n = 9$ ) profitiert.

Ein weiteres Cluster umfasst **Anforderungen an das Shuttle oder den Service**. Insgesamt ist der Aspekt der Sicherheit bzw. Sicherheitsstandards- und -mechanismen im Fahrzeug relevant (d.h. Anforderungen in Bezug auf technische Sicherheit, Innenraum-Videoüberwachung) ( $n = 16$ ). Im Zusammenhang zu Sicherheitsaspekten stehend bezieht sich eine häufig genannte Anforderung auf die Fahrerlosigkeit des Service, d.h., dass der Service nur mit (Sicherheits-)Fahrer genutzt werden würde ( $n = 23$ ) oder bei langsamer Fahrweise ( $n = 1$ ). Diese Aspekte spiegeln ein technologiebezogenes Misstrauen gegenüber dem autonom fahrenden Shuttle wider. Als weitere Facette von sicherheitsbezogenen Nutzungsanforderungen nennen zwei Personen die Bedingung, dass Sicherheitspersonal bei der Fahrt dabei sein sollte. In eine ähnliche Richtung geht auch die Bedingung, dass der Service erst nach einer ausreichenden Testphase genutzt werden würde ( $n = 11$ ). Weitere Anforderungen beziehen sich auf einen möglichst nutzerfreundlichen Buchungsprozess sowie, dass es zusätzlich auch eine Web-Anwendung geben sollte, statt nur einer App ( $n = 13$ ). Die Anforderung einer Barrierefreiheit wurde von einer Person genannt. Die Kategorie ‚Gestaltung des Shuttle-Service‘ bezieht sich auf die Anforderungen, dass das Shuttle z.B. hygienisch/sauber und bequem sein sollte, sodass die Fahrt eine angenehme Nutzungserfahrung darstellt ( $n = 7$ ).

Dem Cluster der **umfeldspezifischen Anforderungen/Nutzungsbedingungen** wurden sechs Kategorien zugeordnet. Die häufigsten Nennungen umfassen das Vorhandensein passender Routenoptionen ( $n = 24$ ) sowie, dass eine Nutzung des Services nur bei fehlenden Alternativfortbewegungsoptionen in Betracht gezogen werden würde ( $n = 23$ ) oder um ansonsten nicht oder nur schwer erreichbare Orte erreichen zu können ( $n = 3$ ). Die passenden Routenoptionen implizieren Bedenken der Befragten, dass deren Routen ggf. außerhalb des Geschäftsgebiets des Services liegen würden. Damit sind auch Nennungen zur Kategorie ‚in der Stadt‘ verbunden ( $n = 5$ ), wonach der Service eher innerorts bzw. in größeren Städten genutzt werden würde. Insbesondere im Falle einer schlechten Verkehrs- bzw. ÖV-Anbindung sehen die Befragten einen Mehrwert durch den Service ( $n = 4$  Nennungen). Zwei Befragte machen die Nutzung des Service abhängig von der Strecke ( $n = 2$ ).

Das Cluster der **situationsspezifischen Anforderungen** umfasst vier Kategorien, die sich jeweils auf Situationen beziehen, in denen der Service genutzt werden würde. Zum einen sind dies Situationen, in denen – z.B. aufgrund von Alkoholkonsum oder eines fehlenden Führerscheins – nicht mit dem Auto gefahren werden darf ( $n = 7$ ). Zum anderen würden die Befragten die Nutzung des Services zu Freizeitzwecken ( $n = 7$ ), als Tourist bzw. auf Reisen (z.B. für Städtetouren) ( $n = 2$ ) oder aufgrund von Stau ( $n = 1$ ) in Betracht ziehen.

Ein weiteres Cluster bilden **personenspezifische Anforderungen**. Beispielsweise würden einige Befragte den Service eher bei begrenzter Personenzahl nutzen wollen (d.h. wenn der Shuttle nicht überfüllt ist) ( $n = 4$ ). Vorteile werden für ältere Personen ( $n = 4$ ), oder bei (körperlichen) Einschränkungen gesehen ( $n = 2$ ).

Unter eine weitere, allgemeine Kategorie (**Sonstiges**) fallen Aspekte wie

- finanzielle Nutzungsbedingungen (wenn es günstiger ist als z.B. Autofahren) ( $n = 73$ ),
- ökologische Gründe (wenn es positive Auswirkungen auf die Umwelt hat) ( $n = 2$ ),
- Neugier ( $n = 2$ ; wobei dies eher ein Nutzungsmotiv statt eine Nutzungsbedingung darstellt),
- der Entfall einer Parkplatzsuche ( $n = 1$ ; ebenfalls eher ein Motiv statt eine Nutzungsbedingung).

**Nicht-Nutzungsbedingungen (Frage 2.2)** („Unter welchen Bedingungen würden Sie dieses Mobilitätskonzept nicht nutzen?“; vgl. Abbildung 42)

Um neben den Nutzungsbedingungen/-anforderungen auch negative Facetten zu erfassen, wurden zudem explizit die Bedingungen erfasst, unter denen das Mobilitätskonzept nicht genutzt werden würde (Nicht-Nutzungsbedingungen). Zum einen umfasst dies das Cluster der **zeitlichen Barrieren**, wie z.B. ein hoher zeitlicher Aufwand ( $n = 21$ ), eine mangelnde Flexibilität und Abhängigkeit ( $n = 18$ ), eine mangelnde Planbarkeit ( $n = 6$ ) oder wenn der Service unpünktlich und unzuverlässig wäre ( $n = 5$ ). Drei Personen geben an, dass diese den Service nicht nutzen würden, wenn feste Termine oder ein fester Zeitplan existieren bzw. sie in Eile wären.

Insgesamt fünf Kategorien lassen sich zum Cluster ‚**Anforderungen an den Shuttle-Service**‘ zusammenfassen. Häufige Nennungen umfassen Sicherheitsbedenken zum autonomen Fahren ( $n = 57$ ). Außerdem könnten Handy-, Internet- oder App-Probleme ein Nicht-Nutzungsgrund darstellen ( $n = 10$ ). Inhaltlich damit verbunden sind auch Privatsphäre-/Datenschutzbedenken ( $n = 2$  Nennungen). Eine mangelnde Barrierefreiheit ( $n = 1$ ) und schlechte Gestaltung des Shuttles-Services (z.B. Hygiene- und Sauberkeitsaspekte) sind weitere Nicht-Nutzungsgründe, die allerdings von vergleichsweise wenigen Befragten ( $n = 8$ ) genannt werden.

Dem Cluster **umfeldspezifische Barrieren** werden vier Kategorien zugeordnet. Einige Befragte geben an, den Service nicht zu nutzen, falls mangelnde Routenoptionen existieren würden ( $n = 23$ ) oder falls andere Alternativen vorhanden wären ( $n = 23$ ). Wenige Nennungen beziehen sich auf Barrieren bezüglich der Streckenlänge oder wenn der Service eine schlechte Anbindung im ländlichen Raum hätte (jeweils  $n = 3$  Nennungen).

Das Cluster der **situations- oder personen(gruppen)spezifischen Nicht-Nutzungsbedingungen** umfasst fünf Kategorien. Eine Nicht-Nutzungsbedingung betrifft den Fall der Überfüllung, d.h. der Service würde nicht genutzt werden, wenn zu viele Personen im Shuttle wären ( $n = 10$ ). Vor dem Hintergrund der zum Befragungszeitpunkt aktuellen Corona-Pandemie nennt eine Person zudem gesundheitliche Barrieren als Nicht-Nutzungsbedingung (unter explizitem Bezug auf die Corona-Pandemie). Die Kategorie ‚Barrieren durch andere Nutzer‘ ( $n = 5$ ) bezieht sich auf Bedenken vor einer Nutzung, falls keine Sicherheitsgarantieren/-maßnahmen ergriffen werden (z.B. zum Schutz vor potentiellen nächtlichen Übergriffen durch andere Mitreisende). Zwei Befragte würden fehlende Transportmöglichkeiten von Gepäck, wie z.B. Fahrrädern oder Kinderwagen als Nicht-Nutzungsgrund bewerten (situationsbezogene Kategorie).

Weitere Nichtnutzungsbedingungen, die dem Cluster **Sonstiges** zugeordnet wurden, sind finanzielle Aspekte ( $n = 87$ ) (d.h. wenn der Shuttle-Service teurer als alternative Verkehrsmittel wäre) oder wenn der allgemeine Nutzungsaufwand zu hoch wäre ( $n = 8$ ). Zwei Personen würden den Shuttle-Service nicht nutzen, wenn der CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Shuttles zu hoch wäre (Umweltaspekte). Eine Person nennt potentielle negative Folgen für Anbieter des öffentlichen (Nah-)Verkehrs als Nicht-Nutzungsgrund. Drei Personen sehen generell keinen Bedarf.



Abbildung 42: Frage 2.2 (Nicht-Nutzungsbedingungen) – Übersicht über die genannten Kategorien

**Mehrwert (Frage 3)** („Worin liegt für Sie der Mehrwert dieser bedarfsorientierten, autonom fahrenden Shuttle-Services mit flexiblen Haltepunkten?“)

Häufige Nennungen des wahrgenommenen Mehrwerts betreffen die **Flexibilität**: neben Assoziationen mit Bezug zu einer allgemeinen (unspezifizierten) Flexibilität ( $n = 26$ ) unterteilt sich dieses Cluster in die räumliche (Erreichbarkeit, kurze Wege zu den flexiblen Haltestellen) ( $n = 65$ ) und die zeitliche Flexibilität (d.h. bedarfsorientierte Verfügbarkeit) ( $n = 36$ ).

Inhaltlich mit Flexibilitätsaspekten verbunden ist die Kategorie der Zeitersparnis ( $n = 15$ ) (vgl. Verbindungslinie in Abbildung 43). Diese Kategorie ist einem allgemeinen Cluster zugeordnet, das neben dem zeitlichen Mehrwert auch Nennungen in Bezug auf verschiedene weitere mehrwertbezogene Facetten umfasst: beispielsweise könnte der Mobilitätsservice als Mobilitätsergänzung dienen ( $n = 12$ ), welche bequem ( $n = 9$ ) und innovativ ( $n = 3$ ) ist. Des Weiteren nehmen einige Befragte ( $n = 5$  Nennungen) den Service auch als vorteilhafter gegenüber dem klassischen öffentlichen Nahverkehr wahr (als eine Art ‚Premium-ÖV‘).

Zwei weitere Cluster bilden die Wahrnehmung eines **finanziellen Mehrwerts** und eines **Umweltvorteils**. Nennungen zu finanziellen Vorteilen betreffen eine antizipierte Kostengünstigkeit des Shuttles, z.B. im Vergleich zum motorisierten Individualverkehr (MIV) ( $n = 4$ ) und bedingt durch die Fahrerlosigkeit (keine Personalkosten) ( $n = 6$ ). Hinsichtlich der Umweltvorteile erwarten einige Befragte z.B., dass der autonom fahrende Shuttleservice den MIV auf Kurzstrecken substituieren könnte und dadurch insgesamt ökologisch vorteilhaft wäre ( $n = 6$ ).

36 Personen sehen keinen Mehrwert in dem Mobilitätsangebot. Die Begründungen hierfür umfassen z.B. Kritik, dass ein Smartphone-Besitz eine Nutzungsvoraussetzung ist oder dass ein derartiges Angebot momentan nicht realisierbar sei bzw. eine „Spielerei“ darstelle. Für einen anderen Befragten stellt die aktuelle Anbindung an den öffentlichen Nahverkehr schon das Optimum da, weswegen diese Person keinen Mehrwert in einer Erweiterung durch einen bedarfsorientiert verkehrenden Shuttleservice sieht.

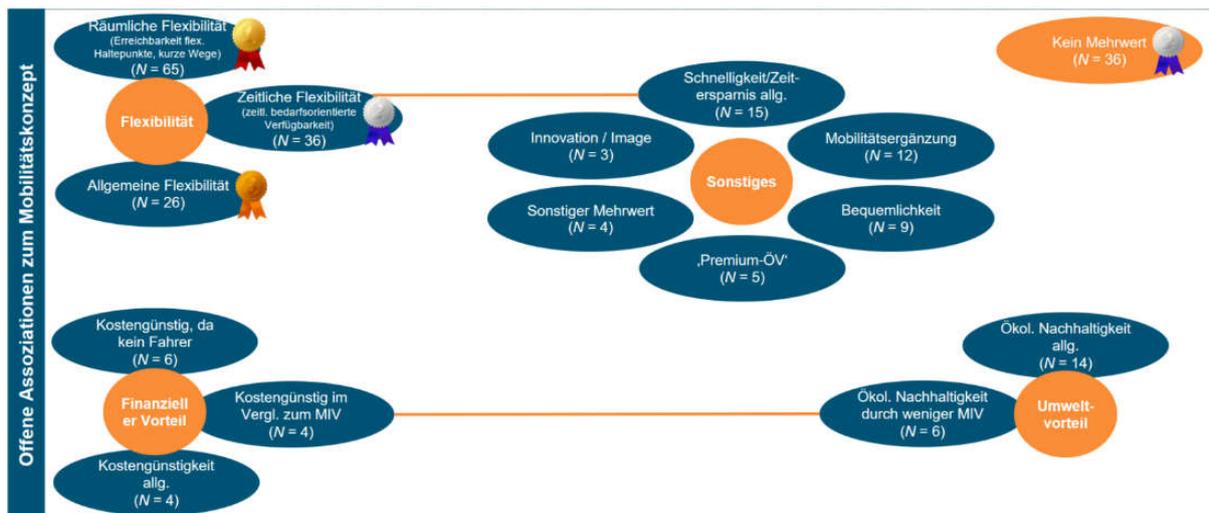


Abbildung 43: Frage 3 (Mehrwert) – Übersicht über die genannten Kategorien

### Risiken

Die weiteren Fragen befassten sich mit Risiken aus Nutzersicht, aber auch aus Sicht der anderen Verkehrsteilnehmer.

**Risiken Nutzersicht (Frage 4.1)** („Was sind potentielle Risiken, wenn Sie sich vorstellen, diesen Service selbst zu nutzen?“)

Die Antworten auf diese Fragen lassen sich in insgesamt fünf Cluster gruppieren: technisches Risiko, physisches Risiko, zeitliches Risiko, sonstige Risiken und ‚kein Risiko‘ (vgl. Abbildung 44).

Häufige Nennungen im Cluster **technisches Risiko** umfassen Bedenken hinsichtlich einer potentiellen Unfallgefahr durch die autonome Fortbewegung ( $n = 28$ ), z.B., dass das Fahrzeug nicht alle (Gefahren-)Situationen korrekt erkennt und/oder angemessen reagiert. Inhaltlich damit verwandt sind zwei Kategorien: zum einen allgemein technische Risiken ( $n = 24$ ), unter der Aussagen bezüglich eines allgemeinen Misstrauens zusammengefasst werden, aber auch, dass bei Notfällen kein Fahrer da ist, um zu helfen. Zum anderen die Kategorie ‚technische Fehler‘ ( $n = 17$ ), welche sich auf Bedenken vor technischen Fehlern bezieht, z.B. im Fall eines Ausfalls der Technik oder des Auftretens von Fehlfunktionen. Drei Nennungen werden zu der Kategorie Probleme beim Ein- und Ausstieg zusammengefasst und beziehen sich auf Bedenken, dass sich die Türen vorzeitig schließen könnten, wenn noch nicht alle Passagiere ein- oder ausgestiegen sind.

Dem Cluster **physisches Risiko** werden Aussagen mit Bezug auf potentielle physische negative Konsequenzen zugeordnet und setzt sich aus insgesamt vier Kategorien zusammen. Zum einen nehmen einige Befragte bei einem Konzept ohne einen potentiell eingreifenden menschlichen Fahrer ein Risiko durch Mitreisende wahr ( $n = 11$ ). Des Weiteren nennen einige Befragte unspezifizierte Aspekte mit Bezug auf die allgemeine Sicherheit ( $n = 10$ ), d.h. ob die Nutzer im Shuttle generell sicher sind. Zum anderen werden Überfüllungsrisiken ( $n = 5$ ) und gesundheitliche Risiken ( $n = 3$ ) genannt (deren Relevanz z.T. durch die zum Befragungszeitpunkt aktuelle Corona-Situation bedingt ist).

Das Cluster der **zeitlichen Risiken** setzt sich zusammen aus vier Risikofacetten mit zeitlichem Bezug. Eine Risikofacetten bezieht sich auf Bedenken aufgrund einer unkalkulierbaren Fahrdauer durch potentielle Umwege ( $n = 15$ ). Des Weiteren werden als potentielle Risiken genannt, dass ein

Wunschhalt nicht angefahren wird ( $n = 8$ ), dass zu lange Wartezeiten bestehen ( $n = 6$ ) oder dass das Shuttle nicht verfügbar ist ( $n = 4$ ).

Dem Cluster **sonstige Risiken** werden diverse Risikofacetten zugeordnet. Neben Nennungen zu allgemeinen Unsicherheitsaspekten ( $n = 12$ ) (z.B. in Bezug auf Funktionalität / Bedienbarkeit oder Vertrauen), sind dies z.B. Datenschutzrisiken durch die Nutzung einer App (transparente Bewegungsprofile etc.) ( $n = 7$ ), finanzielle Bedenken in Bezug auf potentiell hohe Kosten der Shuttlenutzung oder Barrieren aufgrund einer digitalen Zahlung ( $n = 3$ ). Zudem werden von zwei Befragten Haftungsrisiken im Fall eines Unfalls genannt (wobei dieser Aspekt wahrscheinlich eher aus Betreibersicht und nicht aus Nutzersicht relevant ist). Von jeweils einer Person werden das Risiko einer Kannibalisierung des ÖV durch den Shuttledienst benannt sowie (unspezifizierte) Sauberkeitsbedenken.

Dass nicht alle Befragte die Nutzung des Shuttles als risikobehaftet ansehen zeigt, dass die Kategorie mit den absolut betrachtet meisten Nennungen die Kategorie „**keine Risiken**“ ist ( $n = 54$ ). Einige Aussagen dieser Kategorie spiegeln ein Grundvertrauen in z.B. die umfassend getestete autonome Fortbewegung und Funktionalität wider.



Abbildung 44: Frage 4.1 (Risiken Nutzersicht) – Übersicht über die genannten Kategorien

Die nächsten drei Fragen beziehen sich auf Risiken aus Sicht eines Fußgängers, Fahrradfahrers oder Autofahrers. Teilweise haben die Befragten die gleichen Antworten in die Antwortfelder zu Risiken aus Fußgänger-, Fahrradfahrer-, und Autofahrer-Sicht geschrieben, wodurch das Kategoriensystem bei den folgenden drei Fragen ähnlich ist.

**Risiken Fußgängersicht (Frage 4.2)** („Was sind potentielle Risiken, wenn Ihnen dieser Service in Ihrem Alltag als Fußgänger begegnet?“; vgl. Abbildung 45)

Aus Fußgängersicht relevante Risiken sind allgemeine technische Sicherheitsbedenken, wie z.B., dass die Technik nicht richtig funktioniert oder dass nicht alle Situationen richtig erkannt werden ( $n = 39$ ). Des Weiteren wird auch das spezifische Risiko genannt, als Fußgänger vom Shuttle nicht ‚gesehen‘ bzw. erkannt zu werden ( $n = 38$ ). In diesem Zusammenhang nennt ein Befragter auch, dass Interaktionsmöglichkeiten (Blickkontakt, Handzeichen) aus Fußgängersicht fehlen würden.

Weitere Aspekte beziehen sich eher auf antizipierte allgemeine Reaktionen aus Fußgängersicht, wie z.B., dass eine erhöhte Aufmerksamkeit bei einer Begegnung mit dem Shuttle notwendig ist ( $n = 36$ ) (wobei aber auch pragmatisch genannt wird, dass Fußgänger generell im Straßenverkehr aufpassen sollten).

Die mit 64 Nennungen größte Kategorie bezieht sich darauf, als Fußgänger keine Risiken in Bezug auf das autonom fahrende Shuttle zu sehen.

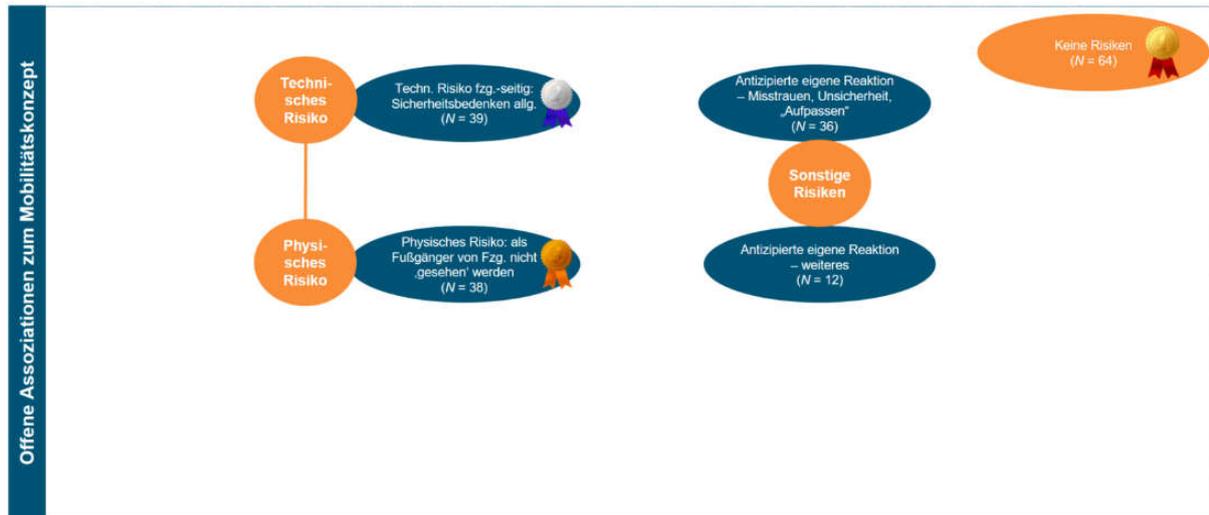


Abbildung 45: Frage 4.2 (Risiken Fußgängersicht) – Übersicht über die genannten Kategorien

**Risiken Radfahrersicht (Frage 4.3)** („Was sind potentielle Risiken, wenn Ihnen dieser Service in Ihrem Alltag als Fahrradfahrer begegnet?“; vgl. Abbildung 46)

Ähnlich wie bei den antizipierten Risiken als Fußgänger, werden auch aus Radfahrersicht allgemeine Sicherheitsbedenken genannt ( $n = 48$ ) sowie Bedenken, als Fahrradfahrer vom Shuttle nicht gesehen zu werden ( $n = 30$ ), beispielsweise, wenn dieses rechts abbiegt. Eine weitere Kategorie bezieht sich auf ein antizipiertes Risiko durch die Fahrgäste, z.B. indem diese beim Ein- und Ausstieg an den virtuellen/flexiblen Haltestellen nicht auf den (Rad-)Verkehr achten ( $n = 3$ ). Im Rahmen der Kategorie ‚Misstrauen, Unsicherheit, „Aufpassen“‘ ( $n = 36$ ) wird u.a. genannt, dass Radfahrer unsicher sein könnten bei der Bewertung, wann bzw. wo das Shuttle (an den flexiblen Haltestellen) anhalten wird.

Ähnlich wie bei der Risikobewertung aus Fußgängersicht fallen die meisten Nennungen in die Kategorie ‚keine Risiken‘ ( $n = 59$ ). Eine Person benennt sogar explizit, dass diese sich als Radfahrer durch die Kamera- und Sensortechnik sicherer fühlen würde, da der Faktor der menschlichen Unaufmerksamkeit wegfallen würde.

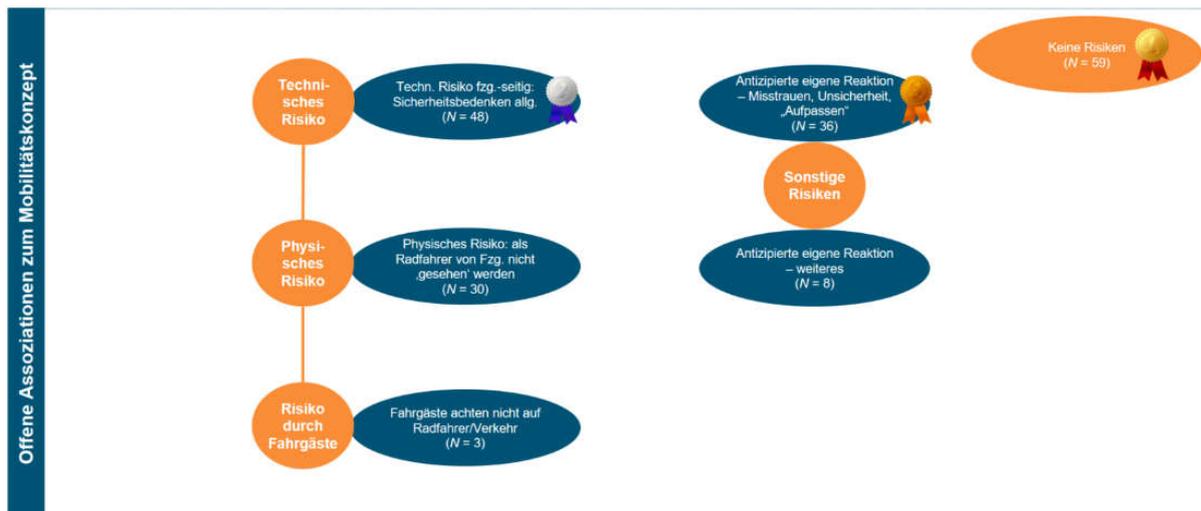


Abbildung 46: Frage 4.3 (Risiken Radfahrersicht) – Übersicht über die genannten Kategorien

**Risiken Autofahrersicht (Frage 4.4)** („Was sind potentielle Risiken, wenn Ihnen dieser Service in Ihrem Alltag als Autofahrer begegnet?“; vgl. Abbildung 47)

Bei den antizipierten Risikobenennungen aus Sicht eines Autofahrers werden mit den Kategorien ‚allgemeine Sicherheitsbedenken‘ ( $n = 66$ ) und den Bedenken, als Autofahrer vom Shuttle nicht erkannt zu werden ( $n = 8$ ), teilweise ähnliche Kategorien genannt, wie aus Fußgänger- und Radfahrersicht.

Ein weiteres Cluster bilden ‚Risiken durch die Fahrgäste und das Shuttle‘: Hierunter fallen Bedenken, dass Fahrgäste beim Ein- und Ausstieg nicht auf den Verkehr achten (1 Nennung), dass das Shuttle durch jederzeitiges und plötzliches Anhalten an den virtuellen Haltestellen eine potentielle Gefahrenquelle für (nachfolgende) Autofahrer darstellen könnte ( $n = 5$ ) oder dass dadurch der Verkehrsfluss beeinträchtigt werden könnte ( $n = 7$ ).

Unter das Cluster ‚sonstige Risiken‘ fallen Nennungen bezüglich eines allgemeinen Misstrauens und Unsicherheiten ( $n = 37$ ). Von zwei Personen werden Bedenken bezüglich einer Schuldfrage bei Unfällen genannt.

Die zweitgrößte Kategorie der Risiken aus Autofahrersicht stellt die Kategorie ‚keine Risiken‘ dar: so sehen 62 Personen keine Risiken und würden das Shuttle als normalen Verkehrsteilnehmer betrachten.

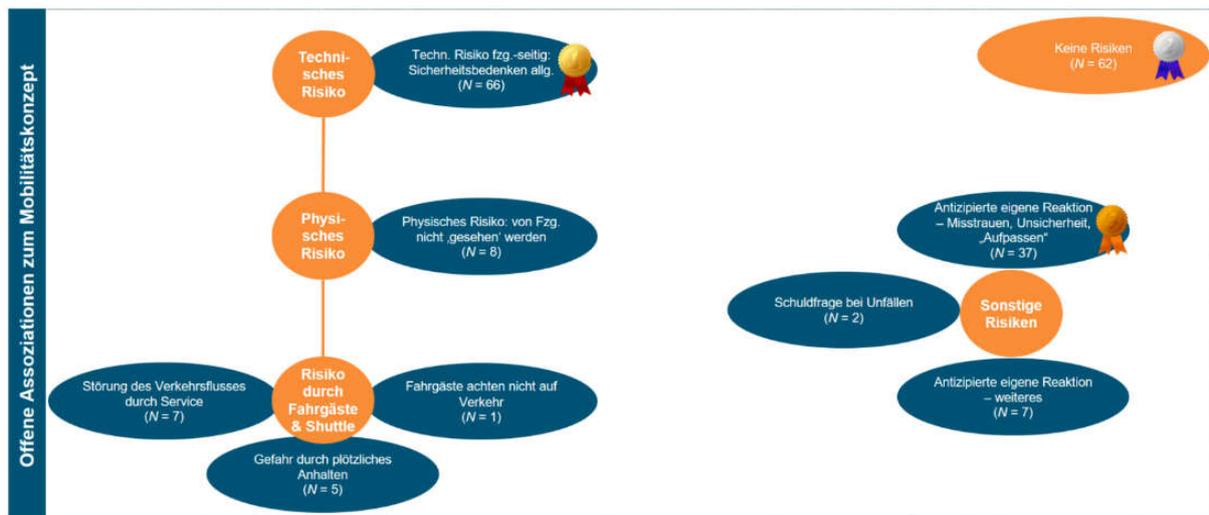


Abbildung 47: Frage 4.4 (Risiken Autofahrersicht) – Übersicht über die genannten Kategorien

**Zielgruppen (Frage 5.1)** („Für welche Personengruppen bzw. in welchen Situationen wäre die Nutzung dieser bedarfsorientierten, autonom fahrenden Shuttle-Services mit flexiblen Haltepunkten vorteilhaft?“; vgl. Abbildung 48)

Wie an dem Kategorienüberblick in Abbildung 48 erkennbar, waren die Nennungen für potentielle Zielgruppen sehr vielfältig, allerdings teilweise auch widersprüchlich. Dies hatte auch die Konsequenz, dass die Zuordnung zu einem übergeordneten Cluster nicht immer trennscharf möglich war.

Am Beispiel des Clusters ‚Altersgruppen‘ ist erkennbar, dass bei den Personengruppen jedes Alterssegment genannt wird, d.h., dass das Konzept für viele Altersgruppen geeignet scheint. Dass u.a. beim Cluster ‚Lebensumfeld‘ teils konträre Gruppen genannt werden (in der Stadt vs. auf dem Land), scheint damit zusammenzuhängen, dass mit diesen Gruppen implizit besondere Anforderungen verbunden sind (z.B. autonom fahrendes Shuttlekonzept grundsätzlich zur Lösung von Mobilitätsproblemen in ländlichen Räumen geeignet, aber die tatsächliche Umsetzung ist aufgrund von langen Strecken und potentiellen Verfügbarkeitsproblemen im ländlichen Raum problematisch).

Da sich auf Basis dieser Nennungen kein klares Zielgruppenprofil ableiten lässt, werden im Folgenden nur die drei häufigsten Nennungen hervorgehoben:

1. Senioren, ältere Leute (wobei einige für diese Zielgruppe die Smartphone-Voraussetzung als problematisch betrachten) ( $n = 84$  Nennungen)
2. Berufstätige ( $n = 54$ )
3. Auto- oder Führerscheinlose oder Nutzer des ÖV ( $n = 50$ )



Abbildung 48: Frage 5.1 (Zielgruppen/-situationen) – Übersicht über die genannten Kategorien

**„Anti“-Zielgruppen (Frage 5.2)** („Für welche Personengruppen bzw. in welchen Situationen wäre die Nutzung dieser bedarfsorientierten, autonom fahrenden Shuttle-Services mit flexiblen Haltepunkten nachteilhaft?“)

In Ergänzung zur Erfassung der Zielgruppen ist in Abbildung 49 dargestellt, für welche Personengruppen oder in welchen Situationen die Nutzung nachteilhaft wäre.

Aufgrund vielfältiger und z.T. konträrer Nennungen wird im Folgenden ebenfalls nur auf die häufigsten Nennungen Bezug genommen, für die der Service als nicht geeignet bewertet wird:

1. Senioren, ältere Menschen und körperlich beeinträchtigte Personen<sup>7</sup> (jeweils  $n = 36$  Nennungen)
2. Kinder & Jugendliche ( $n = 30$  Nennungen)

<sup>7</sup> Die Gruppe der Senioren und die Gruppe der körperlich beeinträchtigten Personen werden auch als Zielgruppe häufig genannt. Die Diskrepanz, dass diese Gruppen gleichzeitig als ‚Anti-Zielgruppe‘ für das Konzept betrachtet wird, mag mit einerseits damit zusammenhängen, dass z.B. Senioren mit Gehbeeinträchtigung einerseits von dem bedarfsorientierten Konzept profitieren könnten (z.B. Abholung von der Haustür), wobei andererseits durch das autonom fahrende Konzept kein Fahrer vorhanden ist, der beim Einsteigen behilflich sein kann. Des Weiteren kann eine mögliche geringere Smartphone-Affinität bei Senioren ein weiterer Erklärungsfaktor für diese Diskrepanz darstellen.



Abbildung 49: Frage 5.2 (ungeeignete Zielgruppen/-situationen) – Übersicht über die genannten Kategorien

### Treiber- und Barrieren-Befragung (quantitativ)

Die aus offenen Assoziationen lediglich Tendenzen hinsichtlich der Wichtigkeit bestimmter treibender oder hemmender Faktoren durch die Anzahl der Nennungen ableitbar sind, ergibt sich die Notwendigkeit einer Folgestudie zur statistischen Quantifizierung der Treiber und Barrieren des Mobilitätsservice. Zudem soll die aktive Akzeptanz (als Nutzer), als auch die passive Akzeptanz (als Verkehrsteilnehmer im Mischverkehr) adressiert werden.

### Methodisches Vorgehen

Es wurde eine Online-Befragung durchgeführt, da dies eine effiziente Methode darstellt, um eine repräsentative Stichprobe zu erreichen. Die Umfrage ist repräsentativ hinsichtlich der Kriterien Alter, Geschlecht und Bevölkerungsverteilung nach Bundesland, was durch die Unterstützung eines Marktforschungsdienstleisters realisiert werden konnte. Die Befragten wurden für ihre Teilnahme incentiviert.

### Beschreibung des Erhebungsinstruments

Der Aufbau der Befragung lässt sich in fünf Abschnitte einteilen (vgl. Abbildung 50). Zu Beginn der Erhebung wurden Fragen zur allgemeinen Mobilitätssituation gestellt, gefolgt von einem Szenario, in dem das Konzept des bedarfsorientierten, autonom fahrenden Shuttle-Services mit flexiblen Haltepunkten vorgestellt wurde. Dieses orientierte sich an dem Szenario, das bereits in der Befragung zu den offenen Assoziationen verwendet wurde. Daran anschließend folgte ein zweiter Szenarioteil, ab dem die Stichprobe zweigeteilt wurde. Der erste Teil wurde gebeten, die Fragen aus Sicht eines Nutzers zu beantworten (aktive Akzeptanz), der zweite Teil sollte die Fragen hingegen aus Sicht eines Verkehrsteilnehmers (z.B. Autofahrer, Fahrradfahrer oder Fußgänger) beantworten (passive Akzeptanz). Entsprechend der jeweiligen Perspektive wurden Fragen u.a. zur Nutzungsbereitschaft und Einstellung sowie zu potentiellen treibenden und hemmenden Einflussfaktoren gestellt. Den dran anschließenden vierten Befragungsteil beantworteten die Befragten wiederum ohne Szenariobezug und ohne Differenzierung in die aktive vs. passive Perspektive. Inhaltlich bezieht sich dieser Teil der Erhebung auf die Einstellung zum autonomen

Fahren an sich und die Nutzung von Ridesplitting-Service. Den Abschluss der Befragung bildet die Abfrage von soziodemografischen Segmentierungsvariablen.



Abbildung 50: Aufbau der Online-Umfrage (quantitative Befragung)

Analog zur Studie zu den offenen Assoziationen, wurden in der Befragung an zwei Stellen ebenfalls Maßnahmen zur Sicherung der Datenqualität eingefügt.

## Ergebnisse

### Betrachtung der Datengrundlage

Für die Datenanalyse wurden 1032 Personen berücksichtigt (nach der Datenbereinigung<sup>8</sup>). Eine Teilnahme an der Befragung war zwischen dem 14.04. und dem 20.04.2021 möglich. Es wurden keine speziellen Teilnahmekriterien definiert. Ähnlich wie bereits bei der Erhebung der offenen Assoziationen war eine Teilnahme an der Befragung ab einem Alter von 13 Jahren möglich. Unter Berücksichtigung dieses die Altersrepräsentativität einschränkenden Kriteriums wurde eine deutschlandweite, bevölkerungsrepräsentative Umfrage nach Alter, Geschlecht und Bundesland angestrebt.

Die Befragten waren im Durchschnitt 48,59 Jahre alt ( $SA = 17,026$ ). Die Stichprobe umfasst 48,4 % männliche und 51,3 % weibliche Teilnehmer (0,3 % anderes Geschlecht). Aus eher ländlichen Gebieten mit weniger als 20.000 Einwohnern stammen 39,3 % der Befragten, während 60,7 % in eher städtischen Gebieten mit 20.000 oder mehr Einwohnern wohnen. Dem Großteil der Befragten (84,8 %) steht ein Fahrzeug zur Verfügung (entweder durch Besitz oder durch Mitnutzung). Der überwiegende Anteil (91,3 %) besitzt zudem ein Smartphone mit mobilem Internet.

Zum Zweck der Akzeptanzerfassung aus aktiver und passiver Sicht wurde die Stichprobe für das Szenario in zwei Gruppen aufgeteilt (vgl. Fragebogenaufbau). 508 Befragte beantworteten die Fragen aus Sicht eines potentiellen Nutzers (aktive Akzeptanz) und 524 Befragte aus Sicht eines

<sup>8</sup> Insgesamt beendeten 1138 Personen die Umfrage. Davon beendeten 1092 Personen die Umfrage ohne Unterbrechung. Personen, die die Umfrage unterbrachen, wurden für die Auswertung nicht berücksichtigt. Unterbrechungen sind insbesondere bei den Fragen zur Nutzungsbereitschaft sowie zu den Treibern und Barrieren kritisch, deren Beantwortung sich auf das Szenario bezog. D.h. diese Fragen sollten unmittelbar unter dem Eindruck der Informationen aus dem Szenario beantwortet werden, was bei einer Unterbrechung der Umfrage durch die Teilnehmer nicht sichergestellt werden konnte (zumal nicht nachvollziehbar war, wann die Unterbrechung stattfand). Des Weiteren wurden Datensätze rausgefiltert, deren Bearbeitungszeit überdurchschnittlich hoch oder gering (zum Entfernen von sogenannten „Durchklickern“) war.

Verkehrsteilnehmers, der antizipieren sollte, dass diesem das autonom fahrende Shuttle im regulären Verkehr begegnen würde (passive Akzeptanz).

### Deskriptive Auswertung der abhängigen Variablen

In Abbildung 51 ist die jeweilige mittlere Bewertung der abhängigen Variablen dargestellt. Die Nutzungsintention (für die aktive Akzeptanz) bzw. die Toleranz (für die passive Akzeptanz) dienen als zentrale Verhaltensprädiktoren. Zudem wurde jeweils die Einstellung erhoben. Diese Konstrukte wurden jeweils mit drei Items gemessen (vgl. Operationalisierung in Tabelle 2.6 und Tabelle 2.7). Vor dem Hintergrund einer erfolgreichen Gütekriterienprüfung konnten die Items zu den jeweiligen Konstrukten zusammengefasst werden (Mittelwertberechnung).

Im Kontinuum einer siebenstufigen Likertskala liegt die mittlere Nutzungsbereitschaft der Stichprobe ‚aktive Akzeptanz‘ ( $n = 508$ ) bei 4,46 ( $SA = 1,936$ ). Etwas weniger als ein Drittel der 508 Befragten in dieser Gruppe (30,9 %) weisen eine sehr hohe Nutzungsbereitschaft auf (Zustimmungsgrad zwischen 6 und 7 auf der Likertskala; vgl. Top-Two-Boxes). Die Einstellung ist mit einem Mittelwert von 5,19 ( $SA = 1,727$ ) tendenziell etwas höher ausgeprägt als die Nutzungsintention. Des Weiteren wurde mit der Frage „Das im Szenario vorgestellte Mobilitätskonzept passt sehr gut zu mir.“ die Kongruenzwahrnehmung erfasst: mit einer mittleren Bewertung von 3,91 ( $SA = 1,941$ ) liegt diese Kongruenz im tendenziell neutralen/unentschiedenen Bereich. Ein mögliches Substitutionspotential des Mobilitätsservice für das eigene Auto sehen die Befragten tendenziell nicht ( $M = 3,18$ ;  $SA = 1,769$ ).

In der Subgruppe der ‚passiven Akzeptanz‘ ( $n = 524$ ) wurden die Toleranzbewertung und die Einstellung als zentrale abhängige Variablen erfasst. Die Toleranzwahrnehmung der Befragten liegt im Durchschnitt bei 4,87 ( $SA = 1,723$ ) und die Einstellung bei einem Mittelwert von 5,16 ( $SA = 1,748$ ).

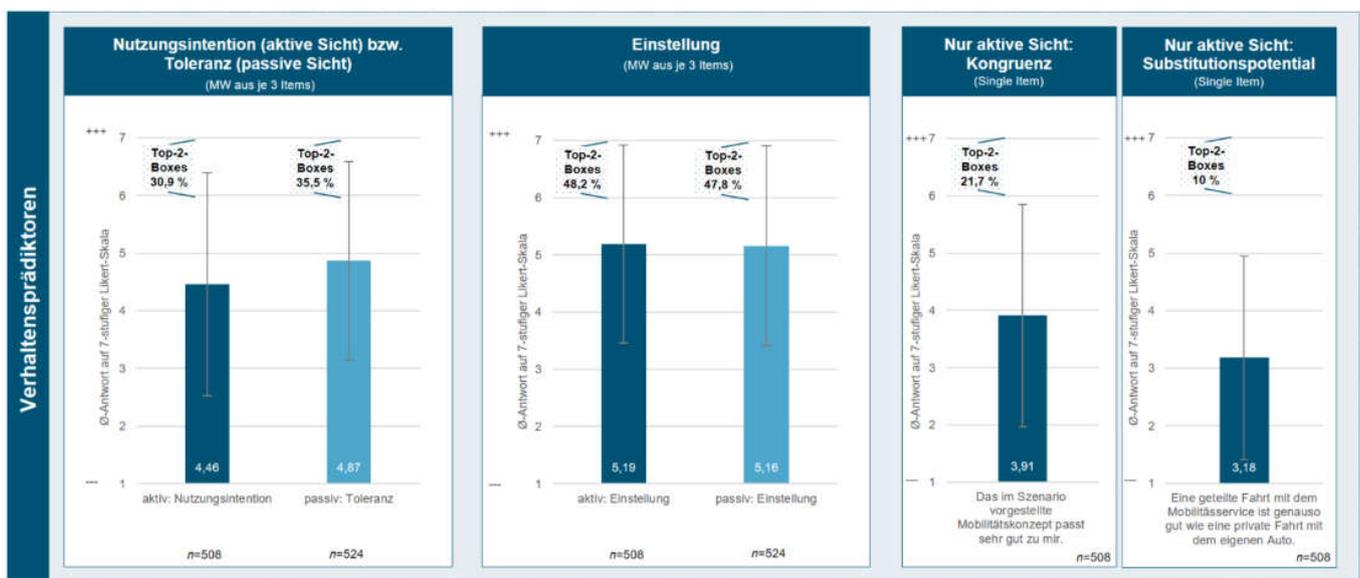


Abbildung 51: Deskriptiva der Verhaltensprädiktoren

**Anmerkung:** Lesart der Top-Two-Boxes: prozentualer Anteil der Befragten, die mit 6 oder 7 (bei Konstrukten: Durchschnittswert der drei Items) auf der siebenstufigen Skala zustimmten.

Für die Stichprobe, die ein Szenario zur aktiven Akzeptanzbewertung sahen, wurden zudem noch gestützte Assoziationen zu diesem Konzept erhoben, die in Abbildung 52 dargestellt sind. Demnach

wird das Konzept des bedarfsorientierten, autonom fahrenden Shuttle-Service mit flexiblen Haltepunkten tendenziell eher als modern, aufregend und umweltfreundlich bewertet. Die weiteren abgefragten Wertepaare befinden sich tendenziell im neutralen/unentschiedenen Bereich.

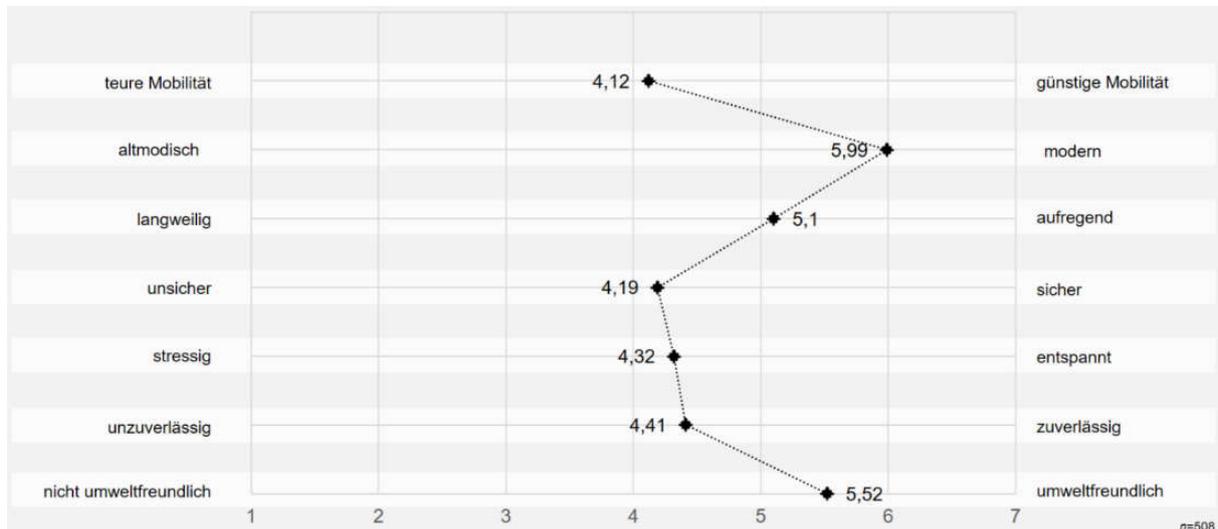


Abbildung 52: Aktive Akzeptanz – Polaritätenprofil zu gestützten Assoziationen

#### Deskriptive isolierte Bewertung der Komponenten des On-Demand-Konzepts und des autonomen Fahrens

Vor dem Hintergrund des Szenarios erfolgte die Bewertung des Mobilitätsservice als Kombination aus einem autonomen Shuttle mit einem bedarfsorientierten/On-Demand-Routingkonzept und flexiblen Haltepunkten. Gegen Ende des Fragebogens wurden die Befragten gebeten, diese beiden Komponenten losgelöst voneinander zu bewerten.

Bekannte Vertreter für bedarfsorientierte Shuttle-Services sind z.B. Berlkönig, Clevershuttle oder MOIA, die jedoch nicht autonom fahren, sondern von einem Fahrer gesteuert werden. Derartige Konzepte sind dem Großteil der Befragten (60,2 % von 1032 Befragten) nicht bekannt. 36,1 % kennen diese Angebote zwar, nutzen diese aber nicht. Lediglich ein Anteil von 3,7 % nutzt derartige Angebote.

Die Nutzungsbereitschaft von fahrgesteuerten, bedarfsorientierten Shuttle-Services mit flexiblen Haltestellen (Konzepte wie z.B. MOIA) liegt im Durchschnitt bei 4,75 ( $SA = 1,775$ ;  $n = 1032$ ).

Wenn nur die 508 Befragten analysiert werden, die das Szenario zur ‚aktiven Akzeptanz‘ bewerteten, liegt die Nutzungsbereitschaft der On-Demand/Ridesplitting-Mobilitätsangebote bei 4,7 ( $SA = 1,785$ ;  $n = 508$ ) und ist somit höher als die Nutzungsintention des Gesamt-Konzepts (Szenario) ( $M = 4,46$ ;  $SA = 1,936$ ;  $n = 508$ ). Ein t-Test für abhängige Stichproben zeigt, dass dieser Unterschied signifikant ist ( $t(507) = -3,343$ ;  $p < 0,001$ )<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> Dieses Ergebnis muss vor dem Hintergrund leichter Abweichungen in der Operationalisierung interpretiert werden. Die Nutzungsbereitschaft für das Gesamt-Konzept stellt den Mittelwert aus folgenden drei Items dar: „Ich würde dieses Mobilitätskonzept in Anspruch nehmen. / Ich kann mir sehr gut vorstellen, so ein Mobilitätskonzept in Zukunft zu nutzen. / Es ist sehr wahrscheinlich, dass ich Nutzer/in dieses

Im Rahmen der Bewertung der zweiten Komponente ‚autonomes, fahrerloses Konzept‘ wurde die Einstellung erhoben. Für die Gesamtstichprobe ( $n = 1032$ ) liegt die durchschnittliche Einstellung bei 4,85 ( $SA = 1,781$ ). Die Teilstichprobe ‚aktive Akzeptanz im Szenario‘ ( $n = 508$ ) bewertet autonomes Fahren ähnlich ( $M = 4,93$ ;  $SA = 1,762$ ). Ein t-Test für abhängige Stichproben zwischen der Einstellung zum autonomen Fahren sich und der Einstellung zum Gesamtkonzept ist bei der Substichprobe ‚aktive Akzeptanz‘ signifikant ( $t(507) = 3,807$ ;  $p < 0,001$ ): die Einstellung zum Gesamtkonzept (vgl. Szenario;  $M = 5,19$ ;  $SA = 1,727$ ;  $n = 508$ ) ist signifikant positiver als die Einstellung zum autonomen Fahren an sich.

Um die Befragungslänge möglichst minimal zu halten, wurde für die isolierte Bewertung der Komponente ‚autonomes Fahren‘ lediglich die Einstellung erfasst (und nicht die Nutzungsbereitschaft). Aus diesen Gründen ist ein integrierter Gruppenvergleich (ANOVA mit Messwiederholung) für die Gruppen a) autonomes Fahren, b) On-Demand-Konzept und c) Gesamtkonzept aus dem Szenario lediglich für die Einstellung<sup>10</sup> möglich (und auch nur für die Gruppe ‚aktive Akzeptanz‘ mit 508 Befragten).

Für die Anwendung einer ANOVA mit Messwiederholung liegt keine Verletzung der Voraussetzung der Sphärizität vor (Mauchly-W (2) = 0,996;  $p = 0,397$ ). Die ANOVA mit Messwiederholung zeigt, dass sich die jeweilige Einstellung zu den drei Konzepten statistisch signifikant unterscheidet ( $F(2, 1014) = 22,462$ ;  $p < 0,001$ , partielles  $\eta^2 = 0,042$ ). Bonferroni-korrigierte paarweise Post-hoc Tests belegten signifikante Unterschiede zwischen allen drei Gruppen, d.h. zwischen:

- autonomer Komponente zur On-Demand-Komponente ( $p < 0,001$ ),
- autonomer Komponente zum Gesamtkonzept ( $p < 0,001$ ),
- On-Demand-Komponente zum Gesamtkonzept ( $p = 0,017$ )

Die positivste Einstellung liegt bei der isolierten Bewertung des On-Demand-Konzepts vor ( $M = 5,38$ ;  $SA = 1,448$ ;  $n = 508$ ), gefolgt von der Bewertung des Gesamtkonzepts (vgl. Szenario zu aktiver Akzeptanz;  $M = 5,19$ ;  $SA = 1,727$ ;  $n = 508$ ) und der Bewertung des autonomen Fahrens an sich ( $M = 4,93$ ;  $SA = 1,762$ ;  $n = 508$ )<sup>11</sup>.

---

*Mobilitätskonzepts werde.*“. Die Nutzungsbereitschaft für die On-Demand-Komponente wurde lediglich als Single Item (siebenstufiges semantisches Differential: „keine Nutzungsbereitschaft - hohe Nutzungsbereitschaft“) erhoben, um die Dauer des Fragebogens zu verkürzen.

<sup>10</sup> Einschränkung ist ein Unterschied in der Operationalisierung zu berücksichtigen. Während sich die Einstellungsmessung beim autonomen Fahren und dem Gesamtkonzept aus drei Items (semantisches siebenstufiges Differential: negativ – positiv; unvorteilhaft – vorteilhaft; nicht nützlich – nützlich) zusammensetzt, wurde die Einstellung zur On-Demand-Komponente nur durch zwei Items (negativ – positiv; nicht nützlich – nützlich) gemessen. Bei einer Wiederholung der messwiederholten ANOVA mit Konstrukten aus jeweils zwei Items, die die Einstellung abbilden (negativ – positiv; nicht nützlich – nützlich), bleiben die Ergebnisse/Signifikanzen bestehen. Eine Ausnahme bildet der Post-hoc-Test zwischen der On-Demand-Komponente und dem Gesamtkonzept, da deren Mittelwertsunterschied nur noch marginal signifikant ist ( $p = ,092$ ).

<sup>11</sup> Eine methodische Limitation ergibt sich aus dem Fragebogaufbau: da der Fokus der Befragung auf dem Treiber-Barrieren-Modell lag, wurde die separate Einstellungsmessung zu On-Demand-Konzepten und zum

**Zwischenfazit:** Die Ergebnisse der ANOVA mit Messwiederholung zeigen, dass das bedarfsorientierte Konzept an sich am positivsten bewertet wird. Somit scheint die autonome, fahrerlose Fortbewegungsart des Shuttles Bedenken auszulösen. Zukünftig sollten die Rollenfacetten eines (Bus-/Shuttle-)Fahrers tiefergehend analysiert werden und in der Implementierungsphase mit entsprechenden Lösungskonzepten berücksichtigt werden (z.B. deuten Nennungen im Rahmen der offenen Assoziationen darauf hin, dass (Bus-)Fahrer nicht nur die tatsächliche Fahraufgabe ausführen, sondern auch als „Sicherheitspersonal“ fungieren, was bei fahrerlosen Konzepten wegfällt und entsprechend ersetzt werden müsste).

*Treiber- und Barrieren-Modell für die aktive Akzeptanz (n = 508)*

Zu Beginn des Auswertungsprozesses wurden die Gütekriterien geprüft (vgl. z.B. Backhaus, Erichson & Weiber, 2015, S. 142 f. und Homburg & Giering, 1996, S. 12 ff. für einen Überblick). Mittels der Software Mplus (Version 7.4) (Muthén & Muthén, 1998-2017) wurde zunächst eine konfirmatorische Faktorenanalyse durchgeführt, auf deren Basis die Berechnung und Prüfung der Indikator- und Faktorreliabilität sowie der Durchschnittlich Extrahierten Varianz (DEV) und der Diskriminanzvalidität erfolgten. Das Cronbachs Alpha-Kriterium wurde mittels der Software IBM SPSS Statistics geprüft.

Alle Konstrukte bzw. Items überschreiten die jeweiligen Schwellenwerte (vgl. Tabelle 5-1). Vor dem Hintergrund, dass der DEV-Wert eines Konstrukts stets größer ist als jede quadrierte Korrelation des Konstrukts mit den anderen Konstrukten des Modells, ist auch das Fornell/Larcker-Kriterium adressiert.

Tabelle 2.6: Aktive Akzeptanz – Gütekriterienprüfung

Faktor	Item	Faktor- ladung	Indikator- reliabilität	Faktor- reliabilität	DEV	Cronbachs Alpha
<i>Schwellenwert</i>			≥ 0,4	≥ 0,6	≥ 0,5	≥ 0,7
Nutzungsbereitschaft	Ich würde dieses Mobilitätskonzept in Anspruch nehmen.	0,971	0,943			
	Ich kann mir sehr gut vorstellen, so ein Mobilitätskonzept in Zukunft zu nutzen.	0,957	0,906	0,972	0,922	0,972
	Es ist sehr wahrscheinlich, dass ich Nutzer/in dieses Mobilitätskonzepts werde.	0,957	0,916			
Zeitliche Flexibilität	Durch diesen Mobilitätsservice bin ich flexibel in der Wahl, dann zu fahren, wann ich möchte.	0,899	0,808			
	Ich kann diesen Mobilitätsservice spontan nutzen, ohne lange Vorausplanung.	0,878	0,771	0,931	0,771	0,931
	Dieser Mobilitätsservice ist jederzeit für mich verfügbar.	0,872	0,760			
	Ich muss mich nicht nach einem Fahrplan richten, sondern kann Fahrten dann antreten, wann ich es möchte.	0,863	0,745			
Räumliche Flexibilität	Durch die virtuellen Haltestellen habe ich Zugang zu dem Mobilitätsservice, egal wo ich bin.	0,837	0,701			
	Durch die flexiblen virtuellen Haltestellen kann mich das Shuttle dort abholen und absetzen, wo ich es möchte.	0,893	0,797	0,920	0,743	0,919
	Ich kann den Einstiegs- und Ausstiegspunkt so legen, wie es mir passt.	0,867	0,752			
	Durch die flexible Lage der virtuellen Haltestellen muss ich nicht so weit laufen.	0,849	0,721			
Abhängigkeit	Bei der Nutzung dieses Mobilitätsservices bin ich zu sehr von den Routen meiner Mitreisenden abhängig.	0,836	0,699			
	Es ist wahrscheinlich, dass sich meine geplante Fahrtzeit durch spontane Routenänderungen zum Abholen anderer Mitreisender erhöht.	0,832	0,692	0,872	0,694	0,872
	Es ist wahrscheinlich, dass der Mobilitätsservice durch spontane Routenänderungen sehr unzuverlässig und schlecht planbar ist.	0,832	0,692			
Navigation	Ich habe Bedenken, dass ich den Weg zur Haltestelle nicht finde.	0,841	0,707			
	Ich habe Bedenken, dass ich eine virtuelle Haltestelle nicht erkenne.	0,815	0,664	0,888	0,727	0,885
	Es ist wahrscheinlich schwierig, den Halteort des Shuttles zu finden.	0,899	0,808			
FoR	...habe ich keinen Ansprechpartner, an den ich mich bei Problemen wenden kann.	0,831	0,691	0,809	0,679	0,805
	... sind die Nutzer bei Problemen erst einmal auf sich gestellt.	0,817	0,667			
	... das autonome Shuttle sehr häufig Fehler macht.	0,864	0,746			
Technische Sicherheitsbedenken	... ich mich im Allgemeinen nicht auf das sichere Fahren des autonomen Shuttles verlassen kann.	0,931	0,867			
	... ich mich generell nicht darauf verlassen kann, dass mich das autonome Shuttle sicher ans Ziel bringt.	0,897	0,805	0,958	0,821	0,958
	... das autonome Shuttle nicht angemessen auf alle kritischen Situationen im Verkehr reagieren kann.	0,974	0,854			
	... die Technik des autonomen Shuttles nicht ausgereift ist, um auf alle Situationen angemessen zu reagieren.	0,914	0,835			

Model Fit Informationen: CFI = 0,975; TLI = 0,970; RMSFA = 0,047 (90% C.I. = 0,035/0,048); SRMR = 0,035

Das Modell der aktiven Akzeptanz ist konzeptionell in Faktoren mit einem positiven Einfluss (Treiber) und mit einem negativen Einfluss (Barrieren) aufgeteilt (vgl. Abbildung 53). Dieses Strukturgleichungsmodell wurde mittels der Software Mplus (Version 7.4) ausgewertet. Die „Fit Indices“ (CFI = 0,971; TLI = 0,967; RMSEA = 0,039; SRMR = 0,043) überschreiten die erforderlichen Schwellenwerte von CFI und TLI > 0,92 sowie SRMR ≤ 0,08 und RMSEA < 0,07 (vgl. Hair et al., 2014, S. 584) und sind daher akzeptabel.

Einen signifikanten positiven Einfluss auf die Nutzungsintention haben die Treiber zeitliche ( $\beta = 0,256$ ;  $p < 0,001$ ) und räumliche Flexibilität ( $\beta = 0,187$ ;  $p = 0,010$ ). Einen negativen Einfluss auf die Nutzungsintention hat die Barriere der technischen Sicherheitsbedenken ( $\beta = -0,408$ ;  $p < 0,001$ ). Dies ist auch insgesamt die Determinante mit der höchsten Einflusstärke auf die Nutzungsbereitschaft. Weder die Abhängigkeitswahrnehmung von anderen, noch die Unsicherheit bei der Identifikation der virtuellen Haltestellen oder die Barriere ‚Fear of higher responsibility durch die fahrerlose Situation‘ haben einen signifikanten Einfluss.

Um potentielle Störeinflüsse durch die Heterogenität der Befragten herauszurechnen, wurden zudem das Geschlecht und Alter der Befragten, die Anzahl an verfügbaren Fahrzeugen pro Haushalt und die Typisierung des Lebensumfelds als eher städtisch oder ländlich als Kontrollvariablen berücksichtigt, von denen jedoch keine Variable einen signifikanten Einfluss aufweist.

Die untersuchten Determinanten erklären 45 % der Varianz der Nutzungsintention.

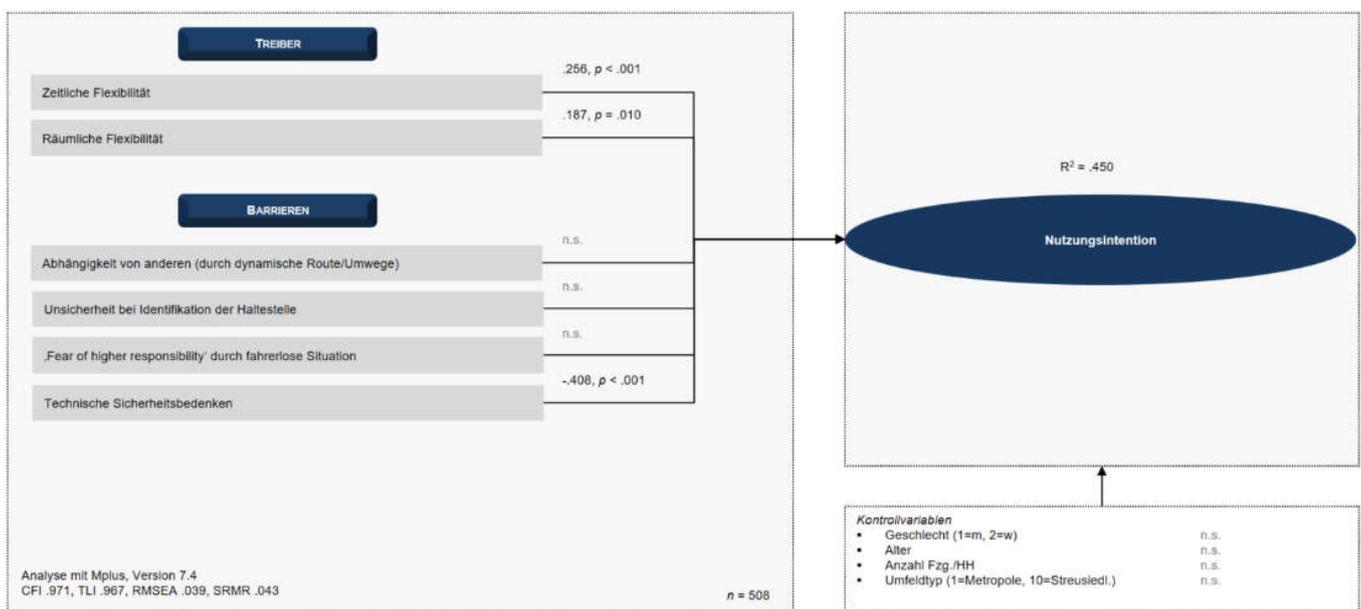


Abbildung 53: Aktive Akzeptanz – Treiber- und Barrieren-Modell

#### Treiber- und Barrieren-Modell für die passive Akzeptanz ( $n = 524$ )

Analog zum Vorgehen beim Modell zur aktiven Akzeptanz, wurden die Gütekriterien ebenfalls für das Modell der passiven Akzeptanz geprüft. Tabelle 2.11 und Abbildung 54 zeigen, dass die jeweiligen Schwellenwerte überschritten werden und die Gütekriterien somit erfüllt sind.

Während die abhängige Variable im Treiber-Barrieren-Modell der aktiven Akzeptanz die antizipierte Nutzungsbereitschaft war, wurde für das Modell zur Erfassung der passiven Akzeptanz die antizipierte Toleranz als abhängige Variable verwendet.

Tabelle 2.7: Passive Akzeptanz – Gütekriterienprüfung

Faktor	Item	Faktor- ladung	Indikator- reliabilität	Faktor- reliabilität	DEV	Cronbachs Alpha
<i>Schwellenwert</i>			$\geq 0,4$	$\geq 0,6$	$\geq 0,5$	$\geq 0,7$
Toleranz	Ich würde dieses Mobilitätskonzept als ganz normalen zusätzlichen Verkehrsteilnehmer betrachten.	0,908	0,824			
	Ich kann mir sehr gut vorstellen, dass so ein Mobilitätskonzept in Zukunft immer mehr zum normalen Straßenverkehr gehört.	0,877	0,769	0,922	0,798	0,922
	Es ist sehr wahrscheinlich, dass ich mich schnell an dieses Mobilitätskonzept im Straßenverkehr gewöhne.	0,894	0,799			
Verkehrssicherheit	Ich glaube, dass autonome Fahrzeuge insgesamt den Verkehr sicherer machen.	0,945	0,893			
	Auch alle anderen Verkehrsteilnehmer sind sicherer, wenn es mehr autonome, miteinander vernetzte Fahrzeuge gibt.	0,942	0,887	0,942	0,890	0,941
Verkehrseffizienz	Ich glaube, dass autonome Fahrzeuge den Verkehrsfluss insgesamt effizienter machen.	0,958	0,918			
	Auch alle anderen Verkehrsteilnehmer kommen schneller voran, wenn es mehr autonome, miteinander vernetzte Fahrzeuge gibt.	0,927	0,859	0,941	0,889	0,94
Kommunikation	Ich habe Bedenken, dass mich das Shuttle nicht erkennt (z.B. beim Abbiegen).	0,963	0,927			
	Ich weiß nicht, wie ich in bestimmten Situationen mit dem Shuttle interagieren soll (ohne Handzeichen oder Blickkontakt).	0,686	0,471	0,819	0,699	0,793
Privatsphäre- bedenken	Ich würde mich unwohl dabei fühlen, dass ich in der Nähe des Shuttles von Umfeldkameras erfasst werde.	0,955	0,912			
	Bei der Umfelderkennung durch das Shuttle hätte ich Bedenken hinsichtlich dem Schutz meiner Privatsphäre.	0,898	0,806	0,924	0,859	0,923
Technische Sicherheits- bedenken	... das autonome Shuttle sehr häufig Fehler macht.	0,879	0,773			
	... ich mich im Allgemeinen nicht auf das sichere Fahren des autonomen Shuttles verlassen kann.	0,941	0,885			
	... ich mich generell nicht darauf verlassen kann, dass mich das autonome Shuttle auch zuverlässig als Verkehrsteilnehmer erkennt.	0,87	0,757	0,952	0,800	0,952
	... das autonome Shuttle nicht angemessen auf alle kritischen Situationen im Verkehr reagieren kann.	0,89	0,792			
	... die Technik des autonomen Shuttles nicht ausgereift ist, um auf alle Situationen angemessen zu reagieren.	0,89	0,792			
Modell Fit Informationen: CFI = 0,980; TLI = 0,972; RMSEA = 0,051 (90% C.I. = 0,042/0,060); SRMR = 0,019						

Einen signifikanten positiven Einfluss auf die antizipierte Toleranz haben der technische Sicherheitsvorteil ( $\beta = 0,256$ ;  $p = 0,024$ ) und eine potentiell höhere Verkehrseffizienz durch autonome Fahrzeuge im gemischten Verkehr ( $\beta = 0,284$ ;  $p = 0,003$ ). Einen negativen Einfluss auf die Toleranz hat die Barriere der Privatsphärebedenken durch die Umfelderkennung des Shuttles ( $\beta = -0,127$ ;  $p = 0,004$ ). Einen jeweils marginal signifikanten Einfluss auf die Toleranz (mit zehnpromzentiger Irrtumswahrscheinlichkeit) aus passiver Sicht haben technische Sicherheitsbedenken ( $\beta = -0,139$ ;  $p = 0,072$ ) und „Kommunikationsprobleme“ mit dem Shuttle durch den nicht vorhandenen Fahrer ( $\beta = -0,109$ ;  $p = 0,072$ ).

Als Kontrollvariablen wurden zum einen die jeweils aktuell genutzten Verkehrs- bzw. Fortbewegungsmittel berücksichtigt, welche allerdings keinen Einfluss auf die Toleranzwahrnehmung haben. Zum anderen wurden der Einfluss des Geschlechts und Alters der Befragten, sowie der Umfeldtypisierung betrachtet. Von diesen Variablen hat lediglich das Alter einen signifikanten, negativen Einfluss ( $\beta = -0,132$ ;  $p < 0,001$ ), d.h. je älter die Befragten sind, desto weniger Toleranz besteht gegenüber dem analysierten Mobilitätsservice.

Die „Fit Indices“ des Modells sind akzeptabel (CFI = 0,972; TLI = 0,968; RMSEA = 0,040; SRMR = 0,051). Insgesamt erklären die betrachteten unabhängigen Variablen 65,3 % der Varianz der abhängigen Variable (Toleranz).

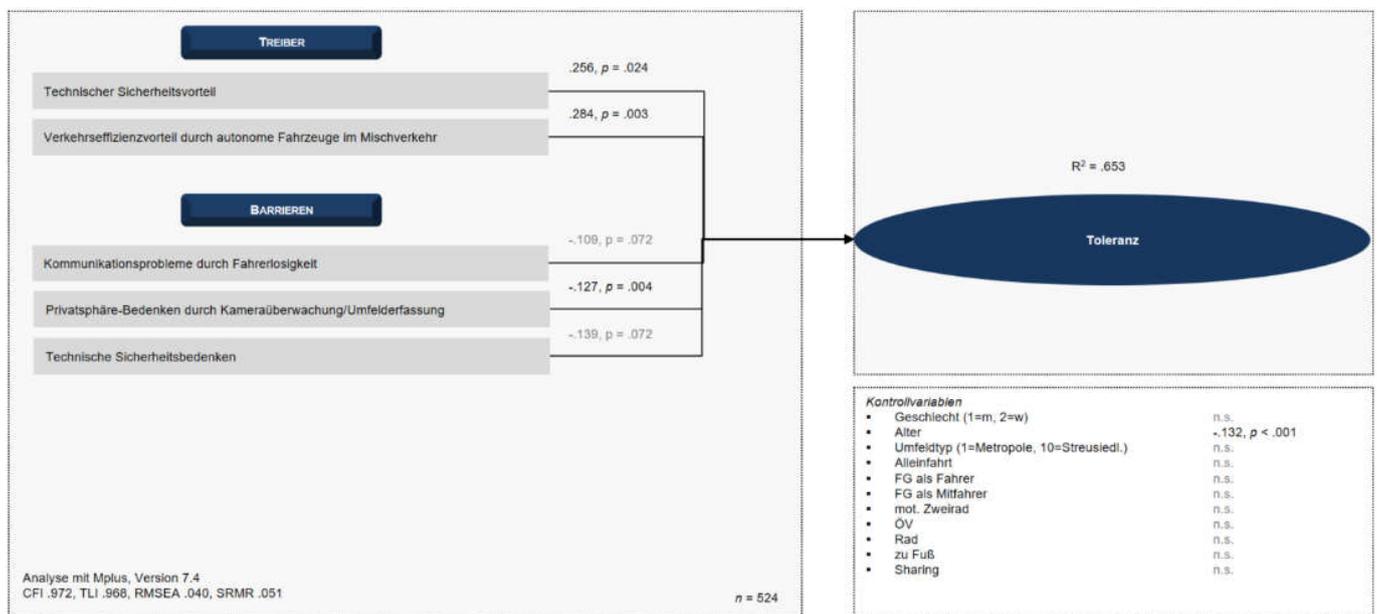


Abbildung 54: Passive Akzeptanz – Treiber- und Barrieren-Modell

### Akzeptanzbewertung im Rahmen der Nutzerstudie (deskriptiv)

Im Rahmen der [Realfahrtstudie](#) wurden u.a. auch Befragungsdaten erhoben, deren Auswertung im Folgenden beschrieben wird. Der Fokus der Befragung(en) lag auf der Evaluation des Mobilitätsservice nach dem Erleben im Realverkehr. Die Nutzerstudie wurde im Rahmen eines „Wizard-of-Oz“-Konzepts durchgeführt, d.h. den Nutzern wurde mitgeteilt, dass sich das Fahrzeug autonom fortbewegt, während dies tatsächlich aber manuell gesteuert wurde. Die (deskriptive) Evaluation erfolgte anhand von Kriterien wie dem Net Promotor Score (Weiterempfehlung), Teilzufriedenheiten (mit der Navigation, der Fahrt, der App), dem antizipierten Wiedernutzungsverhalten sowie weiteren Aspekten der Bewertung der Fahrt.

### Methodisches Vorgehen

Die Nutzerstudie basierte konzeptionell auf einem 2x2 Between-Experimentaldesign (Abbildung 55). In diesem Kapitel werden lediglich deskriptiv die Ergebnisse mit Bezug zur Nutzerakzeptanz beschrieben. Eine integrierte varianzanalytische Auswertung des Experiments wird weiter unten beschrieben. Die folgende deskriptive Analyse erfolgt jeweils getrennt für die beiden Faktorstufen des Faktors ‚Informationsdarbietung‘.

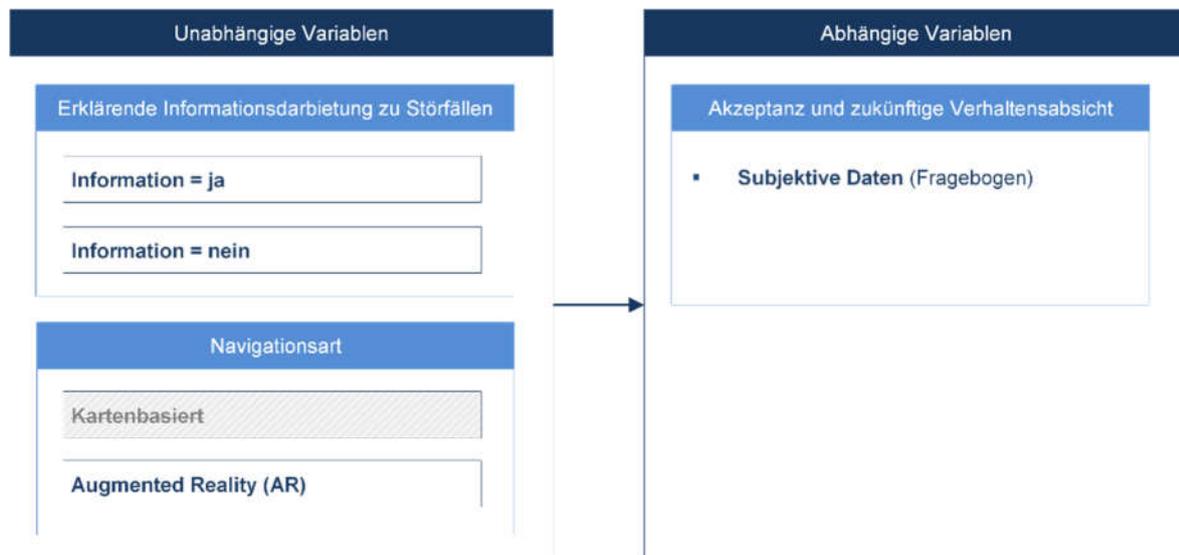


Abbildung 55: Konzeptionelle Darstellung des Experimentaldesigns der Nutzerstudie

**Hinweis:** Neben den subjektiven Befragungsdaten wurden noch weitere abhängige Variablen erfasst (z. B. physiologische Messungen und kamerabasierte Beobachtungen – siehe [Realfahrtstudie](#)).

## Ergebnisse

### Betrachtung der Datengrundlage

Die Durchführung der Studie fand über einen Zeitraum von ca. zwei Wochen statt (Erhebungszeitraum: 12.07. – 29.07.2021). Es nahmen 40 Personen an der Studie teil. Die Teilnehmer waren zwischen 21 und 58 Jahren alt ( $M = 33,7$ ;  $SA = 11,364$ ). Mehr als zwei Drittel der Teilnehmer waren männlich (männlich: 72,5 % ( $\cong 29$  Personen); weiblich: 27,5 % ( $\cong 11$  Personen)). Bis auf zwei Personen hatten alle Teilnehmer einen Führerschein (Klasse B).

Von den 40 Teilnahmen wurden letztlich die Datensätze von 35 Personen deskriptiv ausgewertet. Somit wurden fünf Datensätze nicht berücksichtigt, deren Ausschluss sich wie folgt begründet<sup>12</sup>:

- In der kartenbasierten Bedingung nahmen lediglich drei Personen teil, wodurch der Faktor der Navigationsart nicht gleichverteilt ist im Verhältnis zur AR-Bedingung mit 37 Personen. Da selbst bei deskriptiven Auswertungen auf Basis von drei Datensätzen nur begrenzte Aussagen möglich sind, gingen diese drei Teilnahmen nicht in die weitere Auswertung mit ein.
- Von den insgesamt 40 Teilnehmern konnten sich drei Personen nicht in die Situation hineinversetzen, dass das Shuttle – trotz Sicherheitsfahrer<sup>13</sup> – autonom fährt (diese Personen stimmten der Aussage „Ich konnte mich trotz dem:der Sicherheitsfahrer:in in die Situation

<sup>12</sup> Auf eine Person trafen beide Ausschlusskriterien zu.

<sup>13</sup> Bei autonomen Fahrversuchen im Realverkehr ist ein Sicherheitsfahrer notwendig, der in kritischen Situation eingreifen soll. Den Studienteilnehmern wurde als Coverstory mitgeteilt, dass sich das Fahrzeug autonom fortbewegt und die Person am Steuer als Sicherheitsfahrer fungiert (tatsächlich jedoch bewegte sich das Fahrzeug nicht autonom, sondern wurde manuell von dem Fahrer gesteuert („Wizard-of-Oz“-Konzept)).

hineinversetzen, dass das Shuttle automatisiert fährt.“ gar nicht zu). Da diese Personen somit die Durchführung als „Wizard-of-Oz“-Format bemerkten bzw. die Coverstory anzweifelten, kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich deren Fahrtbewertungen auf die im Fokus der Nutzerstudie stehende Evaluation des autonom fahrenden Mobilitätsservice beziehen.

### Analyse der Nutzungsbereitschaft über den Studienverlauf (Messwiederholung mit drei Abfragen)

Die Evaluation des Mobilitätsservice erfolgte primär anhand von Single Items. Lediglich die Nutzungsbereitschaft wurde als Konstrukt erhoben. Auf einer fünfstufigen Likertskala erfolgte die Abfrage der Nutzungsbereitschaft als Messwiederholung an drei verschiedenen Stellen im Verlauf der Nutzerstudie:

1. vor der Fahrt (Zeitpunkt A bzw. M1)
2. nach der Hinfahrt (Zeitpunkt B bzw. M2)
3. nach der Rückfahrt (Zeitpunkt C bzw. M3)

Bevor die Messwiederholung ausgewertet wird, erfolgte die Durchführung einer **Gütekriterienprüfung** für die Konstrukte. Die Nutzungsbereitschaft wurde mit zwei Items zur hypothetischen Intention und mit einem Item zur konkreten und freiwilligen (Weiter-)Nutzung des Mobilitätsangebots unmittelbar im Anschluss an die Studie erhoben. Aufgrund von Cronbachs Alpha-Werte kleiner als 0,7 jeweils beim dritten Messzeitpunkt (vgl. Tabelle 2.8 und Tabelle 2.9) wurde das Konstrukt der Nutzungsintention lediglich auf Basis der ersten beiden Items gebildet.

**Tabelle 2.8: Bedingung I (Information = ja & AR; n = 18): Gütekriterienprüfung**

Faktor	Kürzel	Item	Faktorladung	Indikatorreliabilität	Faktorreliabilität	DEV	Cronbachs Alpha
Schwellenwert				≥ 0,4	≥ 0,6	≥ 0,5	≥ 0,7
Nutzungsbereitschaft mit 3 Items							
Nutzungsbereitschaft M1	Nint1_M1	Angenommen ich hätte Zugang zu automatisierten Shuttles, würde ich diese in Zukunft nutzen.	0,932	0,869			
	Nint2_M1	Wenn automatisierte Shuttles dauerhaft zur Verfügung stehen, habe ich vor, diese zu nutzen.	0,953	0,908	0,919	0,792	0,823
	Opt_Fahrt_M1	Ich habe vor, mich nach dem Versuch vom automatisierten Shuttle zu meinem Auto/ Fahrrad / Haltestelle fahren zu lassen.	0,774	0,599			
Nutzungsbereitschaft M2	Nint1_M2	Angenommen ich hätte Zugang zu automatisierten Shuttles, würde ich diese in Zukunft nutzen.	0,932	0,869			
	Nint2_M2	Wenn automatisierte Shuttles dauerhaft zur Verfügung stehen, habe ich vor, diese zu nutzen.	0,94	0,884	0,903	0,759	0,716
	Opt_Fahrt_M2	Ich habe vor, mich nach dem Versuch vom automatisierten Shuttle zu meinem Auto/ Fahrrad / Haltestelle fahren zu lassen.	0,725	0,526			
Nutzungsbereitschaft M3	Nint1_M3	Angenommen ich hätte Zugang zu automatisierten Shuttles, würde ich diese in Zukunft nutzen.	0,944	0,891			
	Nint2_M3	Wenn automatisierte Shuttles dauerhaft zur Verfügung stehen, habe ich vor, diese zu nutzen.	0,95	0,903	0,892	0,740	0,636
	Opt_Fahrt_M3	Ich habe vor, mich nach dem Versuch vom automatisierten Shuttle zu meinem Auto/ Fahrrad / Haltestelle fahren zu lassen.	0,652	0,425			
Nutzungsbereitschaft mit 2 Items							
Nutzungsbereitschaft M1	Nint1_M1	Angenommen ich hätte Zugang zu automatisierten Shuttles, würde ich diese in Zukunft nutzen.	0,977	0,955			
	Nint2_M1	Wenn automatisierte Shuttles dauerhaft zur Verfügung stehen, habe ich vor, diese zu nutzen.	0,977	0,955	0,977	0,955	0,953
Nutzungsbereitschaft M2	Nint1_M2	Angenommen ich hätte Zugang zu automatisierten Shuttles, würde ich diese in Zukunft nutzen.	0,973	0,947			
	Nint2_M2	Wenn automatisierte Shuttles dauerhaft zur Verfügung stehen, habe ich vor, diese zu nutzen.	0,973	0,947	0,973	0,947	0,944
Nutzungsbereitschaft M3	Nint1_M3	Angenommen ich hätte Zugang zu automatisierten Shuttles, würde ich diese in Zukunft nutzen.	0,982	0,964			
	Nint2_M3	Wenn automatisierte Shuttles dauerhaft zur Verfügung stehen, habe ich vor, diese zu nutzen.	0,982	0,964	0,982	0,964	0,955

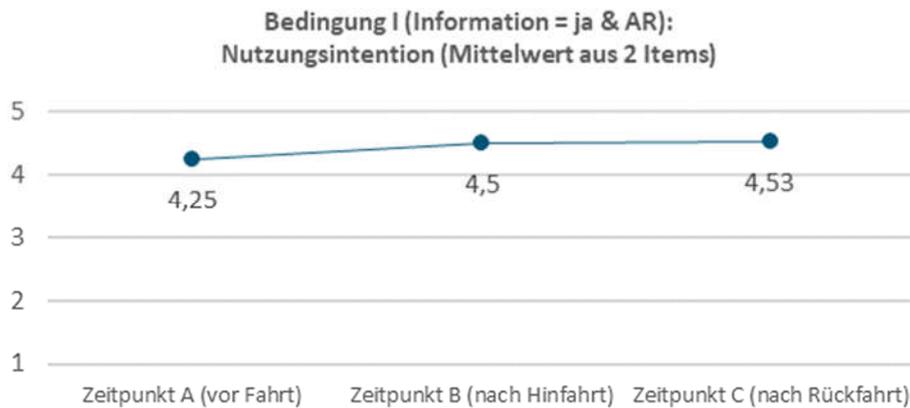
Tabelle 2.9: Bedingung II (Information = nein &amp; AR; n = 17): Gütekriterienprüfung

Faktor	Kürzel	Item	Faktor- ladung	Indikator- reliabilität	Faktor- reliabilität	DEV	Cronbachs Alpha
Schwellenwert				≥ 0,4	≥ 0,6	≥ 0,5	≥ 0,7
Nutzungsbereitschaft mit 3 Items							
Nutzungsbereitschaft M1	NInt1_M1	Angenommen ich hätte Zugang zu automatisierten Shuttles, würde ich diese in Zukunft nutzen.	0,885	0,783			
	NInt2_M1	Wenn automatisierte Shuttles dauerhaft zur Verfügung stehen, habe ich vor, diese zu nutzen.	0,922	0,850	0,872	0,698	0,754
	Opt_Fahrt_M1	Ich habe vor, mich nach dem Versuch vom automatisierten Shuttle zu meinem Auto/ Fahrrad / Haltestelle fahren zu lassen.	0,678	0,460			
Nutzungsbereitschaft M2	NInt1_M2	Angenommen ich hätte Zugang zu automatisierten Shuttles, würde ich diese in Zukunft nutzen.	0,891	0,794			
	NInt2_M2	Wenn automatisierte Shuttles dauerhaft zur Verfügung stehen, habe ich vor, diese zu nutzen.	0,945	0,893	0,888	0,728	0,738
	Opt_Fahrt_M2	Ich habe vor, mich nach dem Versuch vom automatisierten Shuttle zu meinem Auto/ Fahrrad / Haltestelle fahren zu lassen.	0,706	0,498			
Nutzungsbereitschaft M3	NInt1_M3	Angenommen ich hätte Zugang zu automatisierten Shuttles, würde ich diese in Zukunft nutzen.	0,919	0,845			
	NInt2_M3	Wenn automatisierte Shuttles dauerhaft zur Verfügung stehen, habe ich vor, diese zu nutzen.	0,969	0,939	0,869	0,699	0,699
	Opt_Fahrt_M3	Ich habe vor, mich nach dem Versuch vom automatisierten Shuttle zu meinem Auto/ Fahrrad / Haltestelle fahren zu lassen.	0,561	0,315			
Nutzungsbereitschaft mit > 3 Items							
Nutzungsbereitschaft M1	NInt1_M1	Angenommen ich hätte Zugang zu automatisierten Shuttles, würde ich diese in Zukunft nutzen.	0,945	0,893			
	NInt2_M1	Wenn automatisierte Shuttles dauerhaft zur Verfügung stehen, habe ich vor, diese zu nutzen.	0,945	0,893	0,943	0,893	0,879
Nutzungsbereitschaft M2	NInt1_M2	Angenommen ich hätte Zugang zu automatisierten Shuttles, würde ich diese in Zukunft nutzen.	0,958	0,918			
	NInt2_M2	Wenn automatisierte Shuttles dauerhaft zur Verfügung stehen, habe ich vor, diese zu nutzen.	0,958	0,918	0,957	0,918	0,91
Nutzungsbereitschaft M3	NInt1_M3	Angenommen ich hätte Zugang zu automatisierten Shuttles, würde ich diese in Zukunft nutzen.	0,976	0,953			
	NInt2_M3	Wenn automatisierte Shuttles dauerhaft zur Verfügung stehen, habe ich vor, diese zu nutzen.	0,976	0,953	0,976	0,953	0,945

Um signifikante Unterschiede der Nutzungsbereitschaft über die drei Messzeitpunkte feststellen zu können, wurde für beide Gruppen jeweils eine ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt<sup>14</sup>.

**Bedingung I (AR & Information = ja; n = 18):** Aufgrund einer Verletzung der Sphäritäts-Prämisse (Mauchly (2) = 0,558;  $p = 0,009$ ) wurde eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser vorgenommen. Vor dem Hintergrund der Greenhouse-Geisser-Korrektur unterscheidet sich die Nutzungsbereitschaft nicht signifikant zwischen den drei Messzeitpunkten ( $F(1,387;23,576) = 1,509$ ;  $p = 0,239$ ; partielles  $\eta^2 = 0,082$ ). Eine Darstellung der Mittelwerte zeigt Abbildung 56.

<sup>14</sup> Im Rahmen dieses Kapitels erfolgt lediglich die getrennte Auswertung für die Bedingung mit vs. ohne detaillierte Informationsdarbietung nach den Störungsfällen. Eine integrierte Auswertung (z.B. als Between-Within-ANOVA mit dem Zwischensubjektfaktor ‚Informationsdarbietung‘ (ja vs. nein) und dem Innersubjektfaktor der drei Messzeitpunkte der Intention) erfolgt in der [Realfahrtstudie](#).

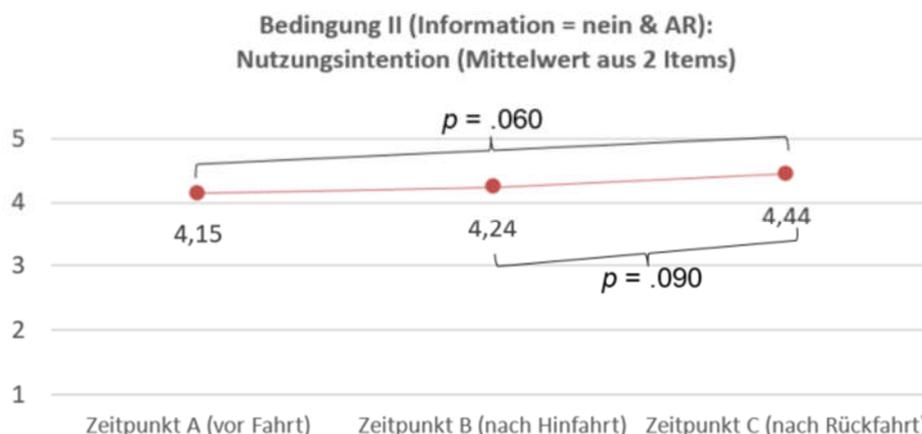


**Abbildung 56: Bedingung I (Information = ja & AR; n = 18): Mittelwerte der Nutzungsbereitschaft für die drei Messzeitpunkte**

**Bedingung II (AR & Information = nein; n = 17):** Eine Verletzung der Sphärizitätsvoraussetzung liegt nicht vor (Mauchly-W(2) = 0,897;  $p = 0,444$ ). Die ANOVA mit Messwiederholung belegt, dass der Messzeitpunkt einen signifikanten Einfluss auf die Nutzungsbereitschaft hat ( $F(2;32) = 4,547$ ;  $p = 0,018$ ; partielles  $\eta^2 = 0,221$ ). Bonferroni-korrigierte Post-hoc-Tests zeigen marginal signifikante Unterschiede zwischen folgenden Messzeitpunkten auf (vgl. auch Abbildung 57):

- Zeitpunkt A (vor der Fahrt) zu Zeitpunkt C (nach der Rückfahrt) ( $p = 0,060$ )
- Zeitpunkt B (nach der Hinfahrt) zu Zeitpunkt C (nach der Rückfahrt) ( $p = 0,090$ )

Die Mittelwerte zeigten, dass die Nutzungsbereitschaft im Verlauf der Messwiederholung stetig ansteigt.



**Abbildung 57: Bedingung II (Information = nein & AR; n = 17): Mittelwerte der Nutzungsbereitschaft für die drei Messzeitpunkte**

### Weiterempfehlung

Der Net Promoter Score (NPS) wurde zur Erfassung der Weiterempfehlungsbereitschaft berechnet. Die NPS-Messung basiert auf einer 11-stufigen Skala, in dessen Kontinuum die Befragten ihre Weiterempfehlungswahrscheinlichkeit eintragen. Personen, deren Weiterempfehlungsbereitschaft im Bereich 0 bis 6 liegt, d.h. eher gering ist, werden als Detraktoren bezeichnet. Personen mit einer Weiterempfehlungsbereitschaft im Bereich 9 oder 10 stellen Promotoren dar. Der Net Promoter

Score berechnet sich aus dem prozentualen Anteil der Promotoren, abzüglich des prozentualen Detraktoren-Anteils. Ein positiver bzw. ein möglichst hoher NPS-Wert gilt als erstrebenswert, da in dem Fall mehr Promotoren als Detraktoren vorhanden sind. Dies ist in beiden Bedingungen der Fall (vgl. Abbildung 58).

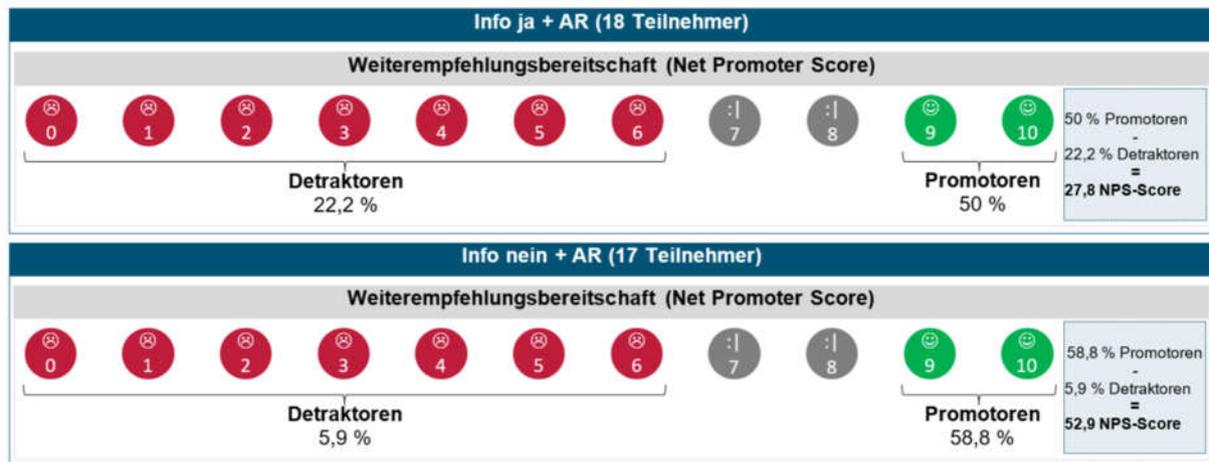


Abbildung 58: Weiterempfehlungsbereitschaft auf Basis des Net Promoter Score

### Deskriptive Evaluation der Fahrt in beiden Bedingungen

Die Evaluation der Fahrt lässt sich thematisch in drei Bereiche strukturieren:

1. Erfassung von Teilzufriedenheiten
2. Antizipiertes Wiederverhaltensverhalten
3. Differenzierte Bewertung der Fahrt anhand verschiedener Kriterien

Ebenso wie in den vorherigen Schritten werden auch die folgenden Analysen getrennt nach den beiden Faktorstufen der Informationsdarbietung beschrieben. Mittels eines t-Tests für unabhängige Variablen wurde jeweils geprüft, ob sich die Bewertungen signifikant zwischen diesen beiden Gruppen unterscheiden.

### Teilzufriedenheiten

Deskriptiv betrachtet besteht in beiden Bedingungen eine sehr hohe Zufriedenheit mit der Fahrt insgesamt (vgl. Abbildung 59). Die Zufriedenheit mit der App und die Zufriedenheit mit der Navigation sind geringer ausgeprägt und liegen im mittleren (App) bzw. tendenziell im ablehnenden Bereich (Navigation). Die jeweiligen Bewertungen unterscheiden sich nicht signifikant zwischen den beiden Bedingungen.

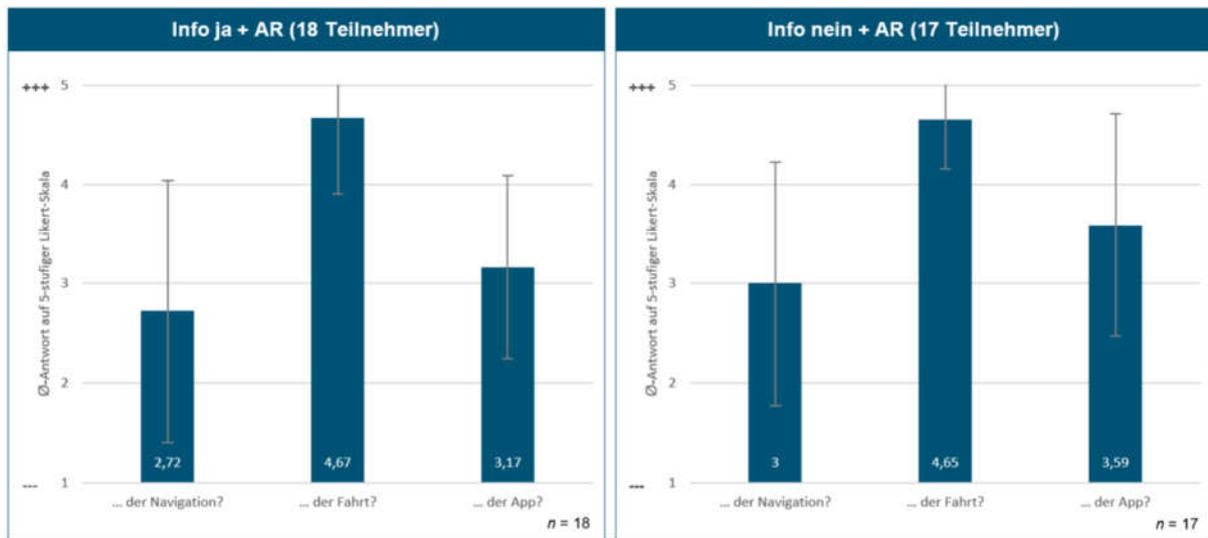


Abbildung 59: Teilzufriedenheiten

Anmerkung: 1 = keine Zustimmung, 5 = volle Zustimmung

### Antizipiertes Wiedernutzungsverhalten

Insgesamt besteht eine hohe Wiedernutzungsbereitschaft (Abbildung 60). Des Weiteren antizipieren die Befragten, dass auch in deren Umfeld eine hohe Nutzungsbereitschaft vorhanden sein könnte. Es besteht zudem eine Tendenz dafür, dass der Mobilitätsservice das private Fahrzeug substituieren könnte. Die jeweiligen Antworten auf die Fragen unterscheiden sich nicht signifikant zwischen den beiden Informations-Bedingungen/Gruppen.

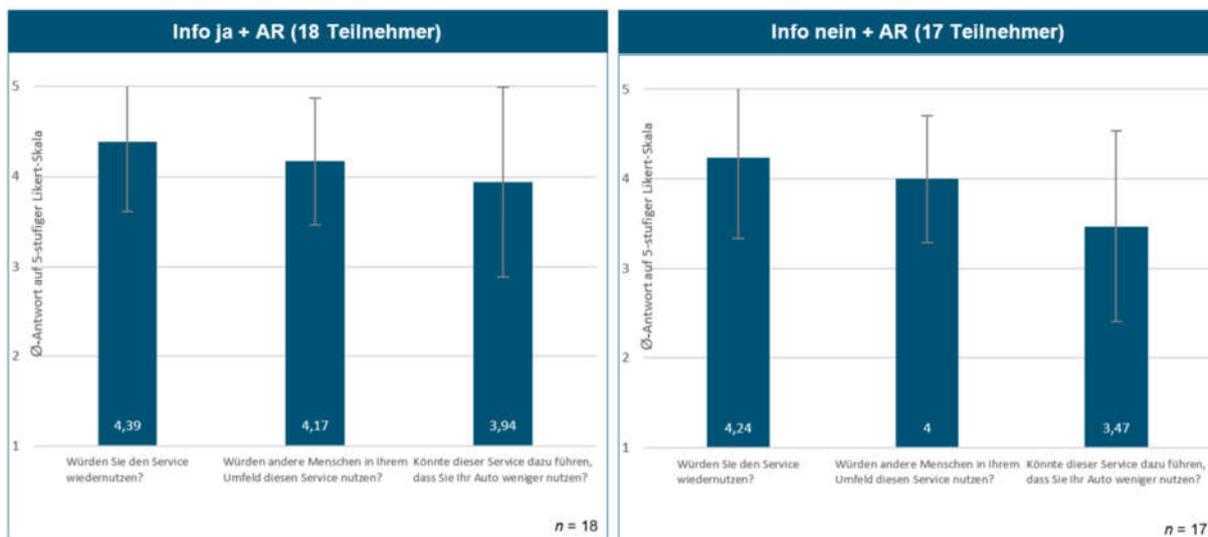
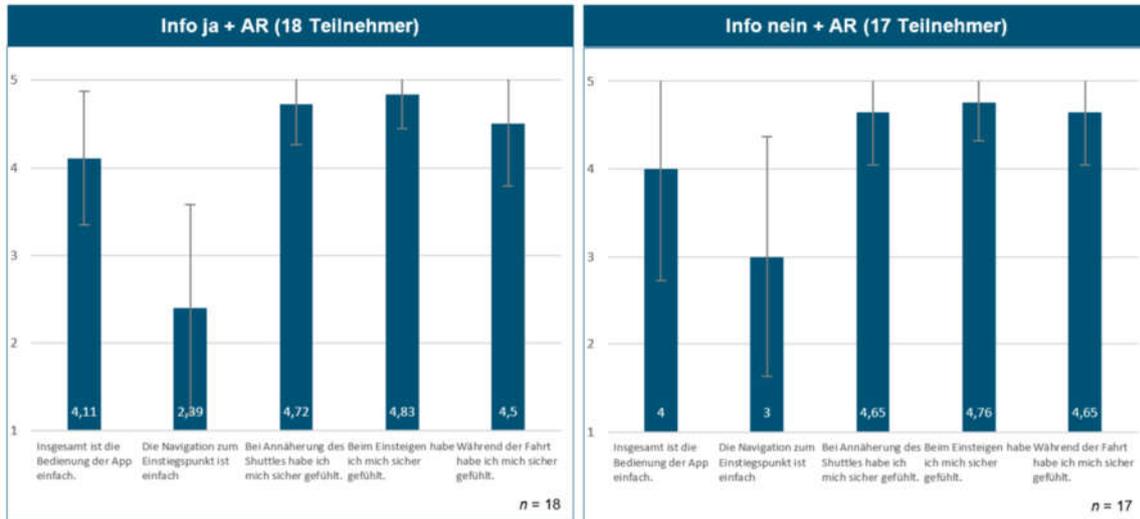


Abbildung 60: Antizipiertes Wiedernutzungsverhalten

Anmerkung: 1 = keine Zustimmung, 5 = volle Zustimmung

**Bewertung der Fahrt**

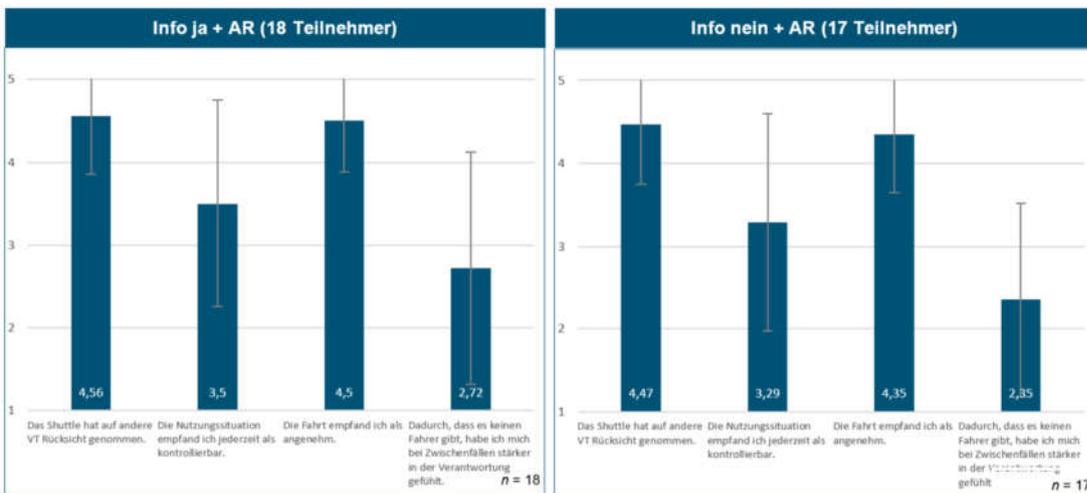
Die Befragten bewerten ihr individuelles Sicherheitsgefühl bei der Annäherung des Shuttles, beim Einstieg und während der Fahrt als hoch (vgl. Abbildung 61). Die Bedienung der App wird tendenziell als eher einfach wahrgenommen. Einzig die Navigation zum Einstiegspunkt wird tendenziell als weniger einfach bewertet. Diese Bewertungen unterscheiden sich nicht signifikant zwischen den beiden Bedingungen/Gruppen.



**Abbildung 61: Bewertung der Fahrt (1/2)**

**Anmerkung:** 1 = keine Zustimmung, 5 = volle Zustimmung

Die Studienteilnehmer bewerten die Fahrt als angenehm und stimmten der Aussage zu, dass das Shuttle auf andere Verkehrsteilnehmer Rücksicht nahm (vgl. Abbildung 62). Die wahrgenommene Kontrollierbarkeit der Fahrt liegt im mittleren, tendenziell zustimmenden Bereich. Verantwortungsbedenken bedingt durch die autonome Fortbewegung des Fahrzeugs werden als eher weniger relevant bewertet. Dies mag auch mit der Existenz eines Sicherheitsfahrers in der Coverstory zusammenhängen. Eine Prüfung auf Mittelwertsunterschiede mittels t-Tests für unabhängige Stichproben ergab für kein Item einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen/Bedingungen.



**Abbildung 62: Bewertung der Fahrt (2/2)**

**Anmerkung:** 1 = keine Zustimmung, 5 = volle Zustimmung

### *Verkehrsrechtliche Begleitforschung*

Im Rahmen der rechtlichen Begleitforschung wurde erarbeitet, wie die Virtualisierung im Einklang mit rechtlichen Vorschriften erfolgen kann. Die Untersuchung widmete sich dabei insbesondere der Frage, inwiefern virtualisierte Verkehrszeichen (z. B. Zebrastreifen) für Verkehrsteilnehmer wahrnehmbar und rechtlich verbindlich sein können. Ein weiterer Gesichtspunkt der rechtlichen Begleitforschung war die Identifikation und Klärung datenschutzrechtlicher Fragen in Bezug auf User und andere Verkehrsteilnehmer. Zunächst ging es darum den datenschutzrechtlichen Rahmen nach der DSGVO bei der Erhebung personenbezogener Daten im Straßenverkehr eruieren.

In einem nächsten Schritt wurde untersucht, inwiefern allgemeine Verhaltensvorschriften und straßenverkehrsrechtliche Gebote auf automatisierte Fahrzeuge übertragbar sind. Im Mittelpunkt der Untersuchung standen rechtliche Überlegungen zu virtuellen Haltestellen, gegründet auf einer Prüfung, wo und unter welchen Umständen das Halten von Fahrzeugen auf öffentlichen Straßen zulässig ist. Aus der Use Case übergreifenden Betrachtung, konnten Rückschlüsse gezogen werden, welche Anwendungsfälle sich aus rechtlicher Sicht zur weiteren Erforschung anbieten.

Danach wurde in Bezug auf die Erprobung und Demonstration automatisierter Fahrzeuge der zulassungsrechtliche Rahmen geprüft. Automatisierte Forschungsfahrzeuge (bis SAE 3) können derzeit nach §§ 21, 70 StVZO genehmigt werden. Anstehende Änderungen im Straßenverkehrsrecht werden einbezogen. Mit Blick auf den Datenschutz müssen die spezifischen Anforderungen an die Datenverarbeitung zu Forschungszwecken beachtet werden. Die Rechtmäßigkeit der Verarbeitung durch öffentliche Stellen, etwa Hochschulen und öffentliche Forschungseinrichtungen, richtet sich nach den datenschutzrechtlichen Vorschriften auf Bundes- oder Landesebene.

Anknüpfend an die bereits erfolgte Prüfung des zulassungsrechtlichen Rahmens für ein autonomes Forschungsfahrzeug wurden die Möglichkeiten nach der neuen Rechtslage (Gesetz zum autonomen Fahren, StVG-Novelle 2021) ergänzt. Das Gesetz zum autonomen Fahren wurde in seinen Grundzügen dargestellt und erweiterte Zulassungsmöglichkeiten geprüft. Ein vertiefender Beitrag beschäftigte sich mit den Voraussetzungen, die vorliegen müssen, damit der Betrieb eines autonomen Fahrzeugs zulässig ist. Im Rahmen der rechtlichen Begleitforschung entstand ein Aufsatz über die Zulässigkeitsvoraussetzungen autonomer Kraftfahrzeuge, der in der NZV veröffentlicht wurde.

Abschließend wurden innerhalb der rechtlichen Begleitforschung Fragen zum Personenbeförderungsrecht identifiziert und geklärt, um die Möglichkeiten einer gewerblichen Nutzung von Ride-Sharing-Konzepten zu eruieren. Falls bei der gewerblichen Umsetzung des Konzeptes personenbezogene Daten verarbeitet werden, sind die datenschutzrechtlichen Grundsätze gemäß Art. 5 DS-GVO einzuhalten. Im Regelfall werden Einwilligungen der betroffenen Personen einzuholen sein. In Bezug auf anstehende Änderungen des zulassungsrechtlichen Rahmens automatisierter und autonomer Fahrzeuge für den Regelbetrieb werden die aktuellen Entwicklungen verfolgt und ergänzt. Ferner stand unter dem Stichwort der Verwertbarkeit die rechtliche Umsetzbarkeit autonomer Shuttle nach dem Verkehrsrecht im Fokus. Eine entscheidende Rolle für eine mögliche, gewerbliche Nutzung autonomer Kraftfahrzeuge spielte auch hier die StVG-Novelle 2021 bzw. das Gesetz zum autonomen Fahren. Mit einem Impulsvortrag über die Gesetzesnovelle wurde eine rechtswissenschaftlich fundierte Diskussion abgehalten. Ein weiterer Punkt, der in der rechtswissenschaftlichen Begleitforschung dargelegt und untersucht wurde, ist das Haftungsrecht bei autonomen Kraftfahrzeugen.

## 2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Tabelle 2.10 fasst die Verwendung der Zuwendung sowie die wichtigsten erzielten Ergebnisse nach Teilvorhaben zusammen.

Tabelle 2.10: Verwendung

<b>Teilvorhaben: Virtuelle Haltestellen im Rahmen des automatisierten und vernetzten Fahrens für innovative Mobilitätsdienstleistungen</b>		
<b>Geplantes Ergebnis</b>	<b>Verwendung der Zuwendung</b>	<b>Erzieltes Ergebnis</b>
Entwicklung und Integration von kooperativen, automatischen Fahrfunktionen und Mensch-Maschine Schnittstellen zur Umsetzung der erarbeiteten Interaktionskonzepte	Erarbeitung der Funktions- und HMI-Entwicklung sowie deren Integration und Tests im Testfeld AIM. Umsetzung der Interaktionskonzepte für virtuelle Haltestellen im Realverkehr.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulation erfolgreich abgeschlossen</li> <li>• Demonstration im Feld erfolgt</li> <li>• Erfolgreich getestete Szenarien</li> </ul>
<b>Teilvorhaben: Kooperierende autonome Fahrfunktionen in vernetzter virtueller Verkehrsinfrastruktur</b>		
<b>Geplantes Ergebnis</b>	<b>Verwendung der Zuwendung</b>	<b>Erzieltes Ergebnis</b>
Identifikation von Virtualisierungsmöglichkeiten von Verkehrsinfrastrukturelementen sowie eine Untersuchung der technischen Realisierbarkeit und eine Analyse der erwarteten Auswirkungen auf den Straßenverkehr	Erarbeitung der Konzepte zu virtueller und digitaler Verkehrsinfrastrukturelementen. Durchführung von Onlinestudien mit Fachexperten zur technischen Realisierbarkeit und Auswirkungen auf den Straßenverkehr.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Externes Experten-Review</li> <li>• Simulation erfolgreich abgeschlossen</li> <li>• Abschlussbericht</li> <li>• Publikation</li> </ul>
<b>Teilvorhaben: Virtuelle Haltestellen im Rahmen des automatisierten und vernetzten Fahrens für innovative Mobilitätsdienstleistungen</b>		
<b>Geplantes Ergebnis</b>	<b>Verwendung der Zuwendung</b>	<b>Erzieltes Ergebnis</b>
Validiertes, integriertes Interaktionskonzept für Mischverkehre unter Einbezug gemischt-physisch-virtueller Verkehrsinfrastrukturelemente auf Grundlage der Ergebnisse des Projekts „Digitaler Knoten 4.0“ (Kooperations-, Informations- und Kommunikationskonzept)	Erarbeitung von Kooperations-, Informations- und Kommunikationskonzepten für virtuelle u. digitale Verkehrsinfrastruktur im Kontext virtueller Bedarfshaltestellen.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Externes Experten-Review</li> <li>• Simulation erfolgreich abgeschlossen</li> <li>• Erfolgreich getestete Szenarien</li> <li>• Abschlussbericht</li> <li>• Publikation</li> </ul>
Erarbeitung eines praxistauglichen Konzepts zum Auf- und Ausbau kooperativer Mobilitätsdienstleistungen auf Grundlage virtueller Bedarfshaltestellen inkl. der entsprechenden Referenzarchitektur	Aufbau von Mobilitätsdienstleistungen im Rahmen virtueller Bedarfshaltestellen inklusive eines dazugehörigen Dispositionssystems und der entsprechenden Referenzarchitektur.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Externes Experten-Review</li> <li>• Abschlussbericht</li> <li>• Publikation</li> </ul>
<b>Teilvorhaben: Methoden für das sichere und effiziente Zusammenwirken automatisierter vernetzter Fahrzeuge und (teil-) virtualisierter Verkehrsinfrastruktur</b>		

Geplantes Ergebnis	Verwendung der Zuwendung	Erzieltes Ergebnis
Absicherung der funktionalen und zeitlichen Korrektheit des Systemverhaltens kooperativer Verkehrssysteme mit gemischt-physisch-virtueller Verkehrsinfrastruktur	Erarbeitung der funktionalen und zeitlichen Korrektheit des Systemverhaltens kooperativer Verkehrssysteme zur Absicherung samt Echtzeit-datenumgang.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Externes Experten-Review</li> <li>• Abschlussbericht</li> <li>• Publikation</li> <li>• Demonstration im Feld erfolgreich erfolgt</li> </ul>
<b>Teilvorhaben: Bevorrechtigung automatisierter und vernetzter ÖV-Fahrzeuge an LSA mit virtuellen Haltestellen</b>		
Geplantes Ergebnis	Verwendung der Zuwendung	Erzieltes Ergebnis
Erprobung und Demonstration des Einsatzes gemischt-physisch-virtueller Verkehrsinfrastruktur entlang einer Referenzstrecke im Testfeld AIM als Bestandteil des Testfelds Niedersachsen	Entwicklung, Integration und Tests der Fahrfunktionen und HMI in der Verkehrsinfrastruktur des Testfeld AIM und Demonstration der Mobilitätsdienstleistung für virtuelle Haltestellen.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Szenarien-Simulation und Realbetrieb konsistent</li> <li>• Simulation</li> <li>• Demonstration im Feld erfolgreich erfolgt</li> </ul>
<b>Teilvorhaben: Erforschung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen als Bausteine innovativer Mobilitätslösungen</b>		
Geplantes Ergebnis	Verwendung der Zuwendung	Erzieltes Ergebnis
Validierung und Bewertung der entwickelten Methoden und Konzepte für den Einsatz gemischt-physisch-virtueller Verkehrsinfrastruktur hinsichtlich Verkehrssicherheit und -effizienz sowie Nutzerakzeptanz	Durchführung und Auswertung von Messkampagne und Studien zur Nutzerakzeptanz sowohl im Realverkehr als auch als Onlineumfrage.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sicherheits- und Effizienzsteigerung bewertet</li> <li>• Nutzerevaluation erfolgt</li> <li>• Abschlussbericht</li> <li>• Publikation</li> </ul>
Begleitung der wissenschaftlich-technischen Fragestellungen durch verkehrsjuristische Betrachtungsansätze	Berücksichtigung von rechtlichen Vorschriften hinsichtlich der Virtualisierung und Digitalisierung von Verkehrsinfrastrukturelementen, wie z. B. Verkehrszeichen.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abschlussbericht</li> <li>• Publikation</li> </ul>

## 2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Aus Tabelle 2.11 geht die inhaltliche Beschreibung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sowie deren Verwendung und potentieller Abweichungen hervor. Die Angaben beziehen sich dabei auf sämtliche nachstehende Teilvorhaben des Verbundvorhabens:

- Bevorrechtigung automatisierter und vernetzter ÖV-Fahrzeuge an LSA mit virtuellen Haltestellen
- Erforschung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen als Bausteine innovativer Mobilitätslösungen
- Kooperierende autonome Fahrfunktionen in vernetzter virtueller Verkehrsinfrastruktur
- Methoden für das sichere und effiziente Zusammenwirken automatisierter vernetzter Fahrzeuge und (teil-) virtualisierter Verkehrsinfrastruktur
- Nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer im Kontext von virtualisierten Haltestellen und zukünftigen Mobilitätskonzepten

- Virtuelle Haltestellen im Rahmen des automatisierten und vernetzten Fahrens für innovative Mobilitätsdienstleistungen
- Virtuelles Halte- und Parkraummanagement

**Tabelle 2.11: zahlenmäßiger Nachweis**

Position	Benennung im Antrag	Verwendung
F0813	Material	Die zur Umsetzung der virtuellen Haltestelle als Anwendungsszenario benötigten Komponenten im Kontext der Entwicklung und Erforschung von Virtualisierungs- und Digitalisierungsmöglichkeiten von Verkehrsinfrastrukturelementen sowie der damit verbundenen Kooperations-, Informations- und Kommunikationskonzepte wurden wie geplant in ViVre integriert.
F0837	Personalkosten	Sämtliche geplanten Arbeiten im Rahmen der wissenschaftlich-technischen Themenbereiche wurden wie vorgesehen adressiert und während der Projektlaufzeit des Verbundprojekts ViVre erarbeitet. Bei den wissenschaftlich-technischen ergaben sich folglich keine Abweichungen oder Änderungen.
F0838	Reisekosten	Aufgrund der COVID-19-Pandemie und den damit verbundenen Lockdown nach Projektbeginn in 2020 kam es zu größeren Abweichungen bei den Reisekosten. Da Dienstreisen zu geplanten Workshops oder wissenschaftlichen Konferenzen nicht mehr möglich waren, kam es hier zu Änderungen, die darin bestanden, dass die ursprünglich eingeplanten Reisevorhaben nicht getätigt wurden.
F0856	Kosten innerbetrieblicher Leistungen	Sämtliche Entwicklungs-, Implementierungs- und Testaktivitäten im Testfeld AIM zur Umsetzung der ausgewählten Anwendungsszenarien wurden wie geplant realisiert.

### 2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das übergeordnete Ziel des Verbundprojektes ViVre war die Vernetzung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen für zentrale Verkehrsknoten zu erforschen und damit Bausteine für innovative und nachhaltige Mobilitätslösungen zu erarbeiten. Insbesondere wurden Konzepte für neue virtuelle Haltestellen erarbeitet, im Straßenverkehr umgesetzt und evaluiert. Dabei wurden integriert neue Funktionen automatisierter vernetzter Fahrzeuge und (teil-)virtualisierter Infrastruktur entwickelt. Für eine optimierte Verkehrssteuerung wurde zudem die Wechselwirkung zwischen virtuellen Haltestellen und anderen betrachteten Verkehrsknoten analysiert und es wurden Möglichkeiten einer koordinierten Verkehrssteuerung der Knoten entworfen. Um diese Projektziele erreichen zu können, war es notwendig die Projektinhalte in verschiedene wissenschaftlich-technische Bereiche zu untergliedern. Nachfolgend wird die Notwendigkeit der verschiedenen wissenschaftlich-technischen Arbeitsbereiche sowie die darin geleistete Arbeit kurz beschrieben. Eine ausführliche Diskussion der Projektergebnisse geht aus [Kapitel 2](#) hervor.

- *Digitalisierungs- und Virtualisierungsmöglichkeiten – Teilvorhaben: Kooperierende autonome Fahrfunktionen in vernetzter virtueller Verkehrsinfrastruktur*  
Ein wesentlicher Schwerpunkt des Verbundvorhabens ViVre lag auf der Virtualisierung und Digitalisierung von Verkehrsinfrastrukturelementen, um im Rahmen einer Smart City oder Smart Region sowohl die Verkehrssicherheit und -effizienz als auch die Anbindung an den ländlichen Raum zu erhöhen. In diesem Zusammenhang wurde es notwendig die Virtualisierungs- und Digitalisierungsmöglichkeiten von Verkehrsinfrastrukturelementen sowie deren technischen Realisierbarkeit und der erwartbaren Auswirkungen auf den Straßenverkehr zu untersuchen. In diesem Zusammenhang wurden intensive Literaturrecherchen durchgeführt, um den aktuellen Stand der Forschung und Technik aufzuarbeiten. Ausgehend von den Literaturrecherchen wurden Konzepte ausgearbeitet, welche Virtualisierungs- und Digitalisierungsmöglichkeiten aufzeigen. Diese Virtualisierungs- und Digitalisierungsmöglichkeiten wurden in einem nächsten Schritt in eine Onlinestudie überführt und einem Fachexpertenforum zur Beurteilung vorgelegt. Die Ergebnisse der Onlinestudie wurden im wissenschaftlich-technischen Kontext veröffentlicht (Touko et al., 2021) und sind im höchsten Maße anschlussfähig.
- *Use Cases, Szenarien und Anforderungsdefinitionen – Teilvorhaben: Virtuelle Haltestellen im Rahmen des automatisierten und vernetzten Fahrens für innovative Mobilitätsdienstleistungen*  
Ein notwendiger Bestandteil der Virtualisierung und Digitalisierung von Verkehrsinfrastrukturelementen sind virtuelle Haltestellen. In diesem Zusammenhang wurde es notwendig virtuelle Haltestellen in Anwendungsszenarien zu überführen. Ausgehend hiervon wurden Storyboards entwickelt, um Anwendungsszenarien, wie z. B. virtuelle Haltestellen beschreiben und spezifizieren zu können. Ein weiterer Teil der in diesem Kontext geleisteten Arbeit bestand darin ausgehend von den Storyboards Use-Cases und funktionale als auch nicht-funktionale Anforderungen abzuleiten. In einer mehrstufigen iterativen und inkrementellen Vorgehensweise konnten so detaillierte Use-Cases und Anforderungen identifiziert werden, welche in einem Szenarien- und Anforderungskatalog dokumentiert wurden.
- *Kooperations-, Informations- und Kommunikationskonzepte – Teilvorhaben: Virtuelle Haltestellen im Rahmen des automatisierten und vernetzten Fahrens für innovative Mobilitätsdienstleistungen*  
Zentraler Bestandteil von virtuellen Haltestellen ist die Kooperation, der Informationsaustausch und die Kommunikation zwischen den beteiligten Akteuren an der virtuellen Haltestelle. Die beteiligten Akteure können dabei z. B. Endnutzer, automatisierte Shuttle, nicht-automatisierte Fahrzeuge, VRU oder die Verkehrsinfrastruktur sein. Um die Entwicklung, Integration und das Testen von virtuellen Haltestellen im Realverkehr des Testfeld AIM zu gewährleisten, wurde es notwendig Kooperations-, Informations- und Kommunikationskonzepte zu erarbeiten. Hierbei wurde auf den Vorarbeiten des Projekts Digitaler Knoten 4.0 aufgesetzt und an die gesonderten Spezifika der Virtualisierung und Digitalisierung von Verkehrsinfrastruktur angepasst. Die sich hieraus ergebenden Konzepte wurde danach entsprechend dokumentiert und in Teilen veröffentlicht.
- *Architekturkonzepte für (teil-)virtualisierte Verkehrsinfrastruktur – Teilvorhaben: Methoden für das sichere und effiziente Zusammenwirken automatisierter vernetzter Fahrzeuge und (teil-)virtualisierter Verkehrsinfrastruktur*

Um virtuelle Haltestellen als Teil eines Kooperations-, Informations- und Kommunikationskonzepts lauffähig umsetzen zu können, bedarf es eines Architekturkonzepts. Ausgehend von den Vorarbeiten zur Referenzarchitektur im Projekt Digitaler Knoten 4.0 wurde ein Architekturkonzept erarbeitet, das an die Anwendungsszenarien und Anforderungen der virtuellen Haltestelle einerseits und der Virtualisierung und Digitalisierung von Verkehrsinfrastruktur andererseits angepasst wurde. Das in ViVre hierfür entwickelte Architekturkonzept wurde entsprechend dokumentiert und bei der Entwicklung der virtuellen Haltestellen integriert.

- *Absicherung und Echtzeitbehandlung – Teilvorhaben: Methoden für das sichere und effiziente Zusammenwirken automatisierter vernetzter Fahrzeuge und (teil-) virtualisierter Verkehrsinfrastruktur*

Zentraler und notwendiger Bestandteil der automatisierten und vernetzten Fahrfunktionen sowie des Informationsaustauschs unter vernetzten Fahrzeugen und mit der Verkehrsinfrastruktur ist die Absicherung und die Echtzeitbehandlung. In diesem Zusammenhang wurden wesentliche Arbeiten durchgeführt. Hierfür wurden ausgewählte Anwendungsszenarien betrachtet und im Softwareentwicklungsprozess berücksichtigt. Die Ergebnisse wurden danach in einen Demonstrator überführt.

- *Funktions- und HMI-Entwicklung – Teilvorhaben: Erforschung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen als Bausteine innovativer Mobilitätslösungen*

Damit die virtuelle Haltestelle als Anwendungsszenario im digitalen Testfeld AIM im Realverkehr demonstriert werden konnte, wurde es notwendig eine Reihe verschiedener Entwicklungs-, Integrations- und Testarbeiten sowohl auf Seiten der Fahrfunktions- und HMI-Entwicklung als auch auf Seiten der Verkehrsinfrastruktur sowie Dispositionssystemanbindung durchzuführen. In diesem Zusammenhang wurde die Automationsfunktion der beteiligten Versuchsträger entwickelt, in den Fahrzeugen integriert und auf dem Testfeld AIM getestet. Ferner wurden die Kommunikations- und Informationskonzepte in die Verkehrsinfrastruktur integriert und getestet. Abschließend wurde das Dispositionssystem entwickelt und Schnittstellen zu automatisierten Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur implementiert und getestet. Ausgehend von diesen Arbeiten war es möglich virtuelle Haltestellen als Anwendungsszenario erfolgreich im Testfeld AIM zu demonstrieren.

- *Simulation, Absicherung des Echtzeitverhaltens und Demonstrator – Teilvorhaben: Bevorzugung automatisierter und vernetzter ÖV-Fahrzeuge an LSA mit virtuellen Haltestellen sowie virtuelles Halte- und Parkraummanagement*

Ein notwendiger Bestandteil der Funktionsentwicklung ist die Simulation der zu entwickelnden Teilfunktionen in der Simulation. Bevor automatisierte und vernetzte Fahrfunktionen in den Versuchsträgern implementiert und im Realverkehr getestet wurden, wurden die Funktionen in Simulationen entwickelt und auf Fahrtüchtigkeit überprüft. Eine weitere wesentliche Arbeit im Rahmen der Simulationen, war die durchgeführten Verkehrsflusssimulationen in SUMO. SUMO als Verkehrsflusssimulation hat es dabei ermöglicht die Verkehrssicherheit und -effizienz von virtuellen Haltestellen und neuartiger Mobilitätsdienstleitungen zu testen, ohne dabei in den fließenden Verkehr eingreifen zu müssen. Im Kontext der SUMO-Simulationen in ViVre wurden verschiedene Fragestellungen zu Verkehrssicherheit und -effizienz virtueller Haltestellen

untersucht und ausgehend hiervon verschiedene SUMO-Simulationen entwickelt. Die Erkenntnisse aus den SUMO-Ergebnissen und entsprechend dokumentiert und in Teilen im wissenschaftlichen Kontext publiziert.

- *Bewertung, Nutzerakzeptanz und verkehrsrechtliche Begleitforschung – Teilvorhaben: Erforschung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen als Bausteine innovativer Mobilitätslösungen*

Um die Nützlichkeit von virtuellen Haltestellen und den damit verbundenen Mobilitätsdienstleitungen bewerten zu können, wurde es notwendig sowohl Messkampagnen als auch Nutzerakzeptanzstudien durchzuführen. In diesem Zusammenhang wurde sowohl eine Messkampagne zur Interaktion verschiedener Akteure an einer virtuellen Haltestelle im Testfeld AIM durchgeführt als auch eine Nutzerstudie zur Mobilitätsdienstleitung im Rahmen der Buchung eines automatisierten Shuttles. Zusätzlich wurde eine Nutzerstudie zur Bewertung der Mobilitätsdienstleitung als Onlineumfrage durchgeführt. Die Ergebnisse aus der Messkampagne und den Nutzerakzeptanzstudien wurden ausgewertet und entsprechend dokumentiert.

## 2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Tabelle 2.12 fasst den voraussichtlichen Nutzen der Ergebnisse sowie deren potentielle Verwertung nach Teilvorhaben zusammen.

**Tabelle 2.12: Verwertung**

<b>Teilvorhaben: Kooperierende autonome Fahrfunktionen in vernetzter virtueller Verkehrsinfrastruktur</b>	
<b>Projektergebnis/ Inhalt</b>	<b>Nutzen/ Verwertung</b>
Virtualisierung und Digitalisierung von Verkehrsinfrastruktur	Die Ergebnisse zur Virtualisierung und Digitalisierung von Verkehrsinfrastrukturelementen aus ViVre sind im höchsten Maße anschlussfähig. Die Virtualisierung und Digitalisierung im Straßenverkehr birgt das Potential die Verkehrssicherheit und -effizienz in einer Smart City / Smart Region zu erhöhen. Ferner bietet es sowohl den ökonomischen als auch den ökologischen Vorteil, dass nicht mehr sämtlichen Aufbauten im Verkehrsraum physisch verbaut werden müssen, sondern digital und virtuell abgebildet werden können.
<b>Teilvorhaben: Erforschung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen als Bausteine innovativer Mobilitätslösungen</b>	
<b>Projektergebnis/ Inhalt</b>	<b>Nutzen/ Verwertung</b>
Neue Fahrfunktions- und Infrastrukturkonzepte für innovative Mobilitätslösungen	Automatisiertes, vernetztes Fahren, Digitalisierung im Verkehr und neue Konzepte intelligenter und virtualisierter Verkehrsinfrastruktur wurden durch ViVre in Braunschweig für eine breitere Öffentlichkeit erfahrbarer.  Der gemeinsam mit der Stadt sowie weiteren Stakeholdern wurden neue Mobilitätslösungen angewandt und die Erkenntnisse auch in anderen Test- und Erprobungsfeldern auch außerhalb Braunschweigs eingebracht.

	<p>Die in ViVre durchgeführten Arbeiten zur Ortungsgenauigkeit von Fahrzeugen und VRU bietet für die meisten Sicherheitssysteme eine Voraussetzung für die Entwicklung industrieller Anwendungen zur Unterstützung der im Verkehrsraum beteiligten Akteure und somit zur Reduktion des Kollisionsrisikos.</p> <p>Wo eine Standardisierung für eine überregionale und herstellerübergreifende Anwendung u. Interoperabilität hilfreich war, wurden die Projekterkenntnisse in Standardisierungsgremien eingebracht.</p> <p>Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse und Technologien zur Weiterentwicklung von AVF-Funktionalitäten, intelligenter Infrastruktur und Verkehrssteuerung sowie neuer Konzepte für den öffentlichen Verkehr wurden von den Verbundpartnern publiziert und auf Messen, Konferenzen und weiteren öffentlichen Veranstaltungen vorgestellt.</p> <p>Die wissenschaftlichen Partner haben die Ergebnisse in Promotionsvorhaben, studentische Arbeiten und die Lehre eingebracht.</p> <p>Insbesondere werden die Erfahrungen und Ergebnisse aus ViVre in die Produktentwicklung der industriellen Partner einfließen und somit frühzeitig Produkte, Dienste und Anwendungen am Markt verfügbar machen, die innovative Mobilitätslösungen benötigten.</p>
<b>Teilvorhaben: Virtuelle Haltestellen im Rahmen des automatisierten und vernetzten Fahrens für innovative Mobilitätsdienstleistungen</b>	
<b>Projektergebnis/ Inhalt</b>	<b>Nutzen/ Verwertung</b>
Virtuelle Haltestellen	<p>Virtuelle Bedarfshaltestellen werden künftig eine wesentliche Rolle in innovativen Mobilitätsdienstleistungen spielen und sind somit als zentrales Projektergebnis von ViVre in höchstem Maße anschlussfähig.</p> <p>Virtuelle Haltestellen bieten die Möglichkeit durch ihren flexiblen Einsatz das innerstädtische Verkehrssystem zu entlasten und somit den Straßenverkehr sicherer und effizienter zu gestalten.</p> <p>Im Kontext mit den Projektergebnissen hinsichtlich der Echtzeiterkennung von virtuellen Haltestellen im Straßenverkehr bietet sich ein großes Potential für anschließende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, da die Echtzeiterkennung von virtuellen Haltestellen einen Beitrag zur Parkraumentlastung leisten kann.</p>
<b>Teilvorhaben: Bevorrechtigung automatisierter und vernetzter ÖV-Fahrzeuge an LSA mit virtuellen Haltestellen</b>	
<b>Projektergebnis/ Inhalt</b>	<b>Nutzen/ Verwertung</b>
ÖPNV-Priorisierung im Rahmen virtueller Haltestellen	Die in ViVre entwickelten Steuerungsverfahren zur Schaltung von Lichtsignalanlagen im Rahmen einer Priorisierung des ÖPNV auf dem Hintergrund virtueller

	Haltestellen sind in höchstem Maße anschlussfähig und werden in Funktionen der OML (Sprache zur Umsetzung der Steuerungslogik) des Verkehrsingenieurarbeitsplatzes LISA Einzug finden.
<b>Teilvorhaben: Virtuelle Haltestellen im Rahmen des automatisierten und vernetzten Fahrens für innovative Mobilitätsdienstleistungen</b>	
<b>Projektergebnis/ Inhalt</b>	<b>Nutzen/ Verwertung</b>
Augmented-Reality-Smartphone-APP	In ViVre wurde eine Augmented-Reality (AR)-Funktion als Teil der Mobilitätsdienstleistung entwickelt, welche es den Endnutzern über eine Smartphone-APP ermöglicht ohne Umstände zur virtuellen Haltestelle zu finden und das gebuchte Shuttle zu identifizieren. Die Weiterentwicklung dieser AR-APP ist in hohem Maße anschlussfähig und als Service einem breiten Nutzer-spektrum zur Verfügung stehen.
<b>Teilvorhaben: Virtuelle Haltestellen im Rahmen des automatisierten und vernetzten Fahrens für innovative Mobilitätsdienstleistungen</b>	
<b>Projektergebnis/ Inhalt</b>	<b>Nutzen/ Verwertung</b>
Testfeld AIM	Die in ViVre Durchgeführten Entwicklungs- und Implementierungsarbeiten im Rahmen der Fahrfunktions-entwicklung und Verkehrsinfrastruktur-anbindung sind direkt in das Testfeld AIM eingeflossen, wie z. B. die Steuerungsverfahren zur Schaltung von Lichtsignal-anlagen im Rahmen einer Priorisierung des ÖPNV auf dem Hintergrund virtueller Haltestellen.  Diese Nutzung und Weiterentwicklung von technischen Komponenten im Testfeld AIM erhöhen somit sowohl den Reifegrad als auch die Sichtbarkeit der Plattform und kommen allen aktuellen und künftigen Projekten sowie allen Forschungs- und Entwicklungspartnern sowie der Stadt Braunschweig zu Gute.
<b>Teilvorhaben: Erforschung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen als Bausteine innovativer Mobilitätslösungen</b>	
<b>Projektergebnis/ Inhalt</b>	<b>Nutzen/ Verwertung</b>
Verkehrsjuristische Bewertung	Durch die Veröffentlichung als Open Content / Fachliteratur können die Erkenntnisse aus ViVre auch nach Projektende im juristisch-politischem Diskurs und weiteren Forschungsprojekten verwertet werden. Auch eine Verwertung der Erkenntnisse durch Industrie und öffentlichen Sektor kann erwartet werden, da durch die Zurverfügungstellung der juristischen Erkenntnisse einen Beitrag zur Schaffung von Rechtssicherheit geleistet wurde.  Die Rechtslage rund um das automatisierte und autonome Fahren entwickelt sich derzeit stetig weiter (vgl. auch die Evaluationsvorgabe des § 1l StVG). Auch sollen dem Gesetz zum autonomen Fahren noch zahlreiche Rechtsverordnungen folgen (vgl. § 1j StVG). Auf europäischer Ebene ist durch das derzeit bestehende Rechtssetzungsverfahren einer sogenannten ADS-Verordnung das automatisierte und autonome

	Fahren ebenfalls Bestandteil einer legislativen Entwicklung (vgl. <a href="https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12152-Automatisierte-Fahrzeuge-technische-Spezifikationen_de">https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12152-Automatisierte-Fahrzeuge-technische-Spezifikationen_de</a> ). Daraus wird die Notwendigkeit einer weiteren Auseinandersetzung mit den nationalen Regelungen resultieren, sodass wissenschaftliche Anschlussfähigkeit zu ViVre vorliegt und die bis dahin erzielten Erkenntnisse im weiteren wissenschaftlichen Diskurs genutzt werden sollten.
--	---

## 2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Wichtige aktuelle Forschungs- oder Entwicklungsergebnisse Dritter konnten während der Durchführung des Vorhabens von den ZE nicht identifiziert werden. Dies bezieht sich auf sämtliche nachstehende Teilvorhaben des Verbundvorhabens:

- Bevorrechtigung automatisierter und vernetzter ÖV-Fahrzeuge an LSA mit virtuellen Haltestellen
- Erforschung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen als Bausteine innovativer Mobilitätslösungen
- Kooperierende autonome Fahrfunktionen in vernetzter virtueller Verkehrsinfrastruktur
- Methoden für das sichere und effiziente Zusammenwirken automatisierter vernetzter Fahrzeuge und (teil-) virtualisierter Verkehrsinfrastruktur
- Nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer im Kontext von virtualisierten Haltestellen und zukünftigen Mobilitätskonzepten
- Virtuelle Haltestellen im Rahmen des automatisierten und vernetzten Fahrens für innovative Mobilitätsdienstleistungen
- Virtuelles Halte- und Parkraummanagement

## 2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Tabelle 2.13: Veröffentlichungen

Teilvorhaben: Methoden für das sichere und effiziente Zusammenwirken automatisierter vernetzter Fahrzeuge und (teil-) virtualisierter Verkehrsinfrastruktur			
Titel	Datum	Ort	Inhalt
Cooperative Maneuvers of Highly Automated Vehicles at Urban Intersections: A Game-theoretic Approach	05/2020	Proceedings of the 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS)	We propose an approach how connected and highly automated vehicles can perform cooperative maneuvers such as lane changes and left-turns at urban intersections where they have to deal with human-operated vehicles and vulnerable road users such as cyclists and pedestrians in so-called mixed traffic. In order to support cooperative maneuvers the urban intersection is equipped with an intelligent controller which has access to different sensors along the intersection to

			<p>detect and predict the behavior of the traffic participants involved. Since the intersection controller cannot directly control all road users and - not least due to the legal situation - driving decisions must always be made by the vehicle controller itself, we focus on a decentralized control paradigm. In this context, connected and highly automated vehicles use some carefully selected game theory concepts to make the best possible and clear decisions about cooperative maneuvers. The aim is to improve traffic efficiency while maintaining road safety. Our first results obtained with a prototypical implementation of the approach in a traffic simulation are promising.</p>
Measurement-based Online Verification of Timing Properties in Distributed Systems	09/2020	2020 International Conference on Omni-layer Intelligent Systems (COINS)	<p>We present a novel concept for the measurement-based online verification of timing properties in distributed systems. Based on a methodology for the consistent real-time handling in advanced driver assistance systems and automated driving functions, it incorporates a measurement infrastructure with generic interfaces, event recorders, and timing monitors generated directly from timing specifications. The primary goal is to detect specified events at subsystem interfaces and to calculate signal propagation times. Following a prototypical implementation, the accuracy of a concrete instance of our concept is evaluated. A demonstration including a realistic hardware-in-the-loop simulation proves the practical applicability and shows conceivable extensions for future activities.</p>
Challenges in Achieving Explainability for Cooperative Transportation Systems	09/2022	Second International Workshop on Requirements Engineering for Explainable Systems (RE4ES)	<p>The anticipated presence of highly automated vehicles and intelligent infrastructure systems in urban traffic will yield new types of demand-driven mobility and value-added services. To provide these services, future transportation systems will consist of large-scale, cooperative ensembles of highly automated and connected systems that operate in mixed traffic and have to interact with human drivers and vulnerable road users while coordinately</p>

			ensuring traffic efficiency and safety. We posit that the ability to explain processes and decisions is essential for such systems. Adequately addressing the needs of the involved actors will require that explainability and trustworthiness are handled as core properties in the development of highly automated systems. To support explainability-driven design approaches, we identify a set of explainability challenges in the context of a large-scale ongoing endeavor on cooperative transportation and present approaches to target these challenges.
<b>Teilvorhaben: Erforschung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen als Bausteine innovativer Mobilitätslösungen</b>			
<b>Titel</b>	<b>Datum</b>	<b>Ort</b>	<b>Inhalt</b>
Verkehrszulassung von autonomen Forschungsfahrzeugen unter besonderer Berücksichtigung einer Ausnahmegenehmigung nach § 70 StVZO	2020	Neven Josipovic (Hrsg.), Erprobung autonomer Fahrzeuge – Rechtliche Anforderungen und Folgerungen für ausgewählte Anwendungsfälle, Mobilitätsrecht-Texte, Berlin.	In ihrem Beitrag untersucht Sophie Gatzke, unter welchen Voraussetzungen autonome Forschungsfahrzeuge zum Zwecke der Erprobung im öffentlichen Straßenverkehr zugelassen werden können. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der dogmatischen Einordnung von § 70 StVZO und der damit einhergehenden Frage, inwiefern die StVZO überhaupt eine Zulassung eines fahrerlosen Kraftfahrzeuges vorsieht.
Haftungsrechtliche Implikationen für die Erprobung autonomer Fahrzeuge auf Privatgelände	2020	Neven Josipovic (Hrsg.), Erprobung autonomer Fahrzeuge - Rechtliche Anforderungen und Folgerungen für ausgewählte Anwendungsfälle, Mobilitätsrecht-Texte, Berlin	<i>In ihrem Beitrag widmet sich Pauline Mellenthin der Frage, welches haftungsrechtliche Regime auf Kraftfahrzeuge mit autonomen Fahrfunktionen anzuwenden sind. Insbesondere im Erprobungsbetrieb wird das autonome Forschungsfahrzeug häufig noch nicht auf öffentlichen Straßen eingesetzt. Doch Unfälle und Schäden können auch auf Privatgelände entstehen – daher ist insbesondere für den Forschungsbetrieb erforderlich, die Haftungsfrage zu klären. Pauline Mellenthin</i>

			<i>entwickelt in ihrem Beitrag außerdem konkrete Vorschläge, wie die Haftungswahrscheinlichkeit von Anfang an geringgehalten werden kann.</i>
<b>Teilvorhaben: Virtuelle Haltestellen im Rahmen des automatisierten und vernetzten Fahrens für innovative Mobilitätsdienstleistungen</b>			
<b>Titel</b>	<b>Datum</b>	<b>Ort</b>	<b>Inhalt</b>
Designing Ride Access Points for Shared Automated Vehicles – An Early Stage Prototype Evaluation	2020	In: Stephanidis C., Antona M., Ntoa S. (eds) HCI International 2020 - Communications in Computer and Information Science, vol 1294. Springer, Cham. <a href="https://doi.org/10.1007/978-3-030-60703-6_72">https://doi.org/10.1007/978-3-030-60703-6_72</a>	Future oriented mobility solutions, based on digital technologies, emphasize the need for digital and flexible urban infrastructure to give guidance to users. In the case of automated mobility on-demand (AMoD) services high user experience (UX) is essential for user acceptance. One of the main challenges is to enhance the user's competence and information supply to overcome the physical meeting problem of user and shared automated vehicle (SAV). Hence, the need for the new concept of defined virtual ride access points (RAP) derives. The objective of this study is to evaluate a first human-centered RAP design prototype regarding usability and intuitiveness. By remotely interviewing 18 participants of young age, residing in urban areas and with experience in using ride-sharing services the authors show that already a first RAP prototype was positively rated with regard to usability and intuitiveness. So the mere existence of RAP presented with means of augmented reality has the potential to improve UX of new urban mobility services. With his article the authors seek to conceive guidelines for future digital human-centered AMoD infrastructure.
<b>Teilvorhaben: Erforschung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen als Bausteine innovativer Mobilitätslösungen</b>			
<b>Titel</b>	<b>Datum</b>	<b>Ort</b>	<b>Inhalt</b>
Verkehrszulassung autonomer Forschungsfahrzeuge	06/2021	<a href="#">FMR-Arbeitspapier</a>	In Ihrem Blogbeitrag stellt Sophie Gatzke nach neuer Rechtslage dar, wie autonome Forschungsfahrzeuge zugelassen werden können. Hintergrund ist das In-Kraft-Treten des sog. Gesetzes zum autonomen Fahren im Sommer 2021, in welchem erstmalig bundesweit

			einheitliche Vorschriften bezüglich der Verkehrszulassung von autonomen Forschungsfahrzeugen geschaffen wurden.
Zulässiges Halten von Ride-Sharing-Fahrzeugen	08/2021	<a href="#">FMR-Arbeitspapier</a>	Anknüpfend an den Use-Case der automatisierten und virtualisierten Personenbeförderung untersucht Sophie Gatzke in ihrem Beitrag, wie innovative Mobilitätskonzepte im Straßenverkehr halten dürfen, um beförderte Personen ein- und aussteigen zu lassen. Dabei untersucht Sophie Gatzke vor allem auch die Privilegierung anderer Mobilitätskonzepte.
Virtuelle Fußgängerüberwege beim automatisierten Fahren	09/2021	<a href="#">FMR-Arbeitspapier</a>	Denkbar ist, dass autonome Kraftfahrzeuge künftig auch durch den Einsatz von projizierten Verkehrszeichen mit ihrer Umgebung kommunizieren. Sophie Gatzke klärt in ihrem Beitrag die Rechtsnatur eines solchen projizierten Verkehrszeichen und zeigt dadurch auf, welche rechtlichen Risiken durch diese neue Technologie entstehen können.
<b>Teilvorhaben: Virtuelle Haltestellen im Rahmen des automatisierten und vernetzten Fahrens für innovative Mobilitätsdienstleistungen</b>			
<b>Titel</b>	<b>Datum</b>	<b>Ort</b>	<b>Inhalt</b>
New Concepts to Improve Mobility by Digitization and Virtualization: An Analysis and Evaluation of the Technical Feasibility	11/2021	5 <sup>th</sup> EAI International Conference, INTSYS 2021	Traffic infrastructures are one of the central elements of today's mobility. They are crucial for road traffic and offer road users space and orientation for mobility to move within public space. Road infrastructure is currently designed for non-autonomous vehicles. To be able to support new technologies and services related to autonomous driving, adaptation and enhancement of the capability of current traffic infrastructures is necessary. An innovative solution is the digitization and virtualization of conventional traffic infrastructures. In this paper, the possibilities of digitization and virtualization of current traffic infrastructure elements are presented and discussed in the form of an implementation concept. The paper illustrates the most significant use cases, where digitization and virtualization may lead to the improvements in the efficiency of traffic flow and management. Part of this

			contribution is also an analysis and evaluation of the technical feasibility of single-use cases for digitizing and virtualizing traffic infrastructures.
<b>Teilvorhaben: Erforschung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen als Bausteine innovativer Mobilitätslösungen</b>			
<b>Titel</b>	<b>Datum</b>	<b>Ort</b>	<b>Inhalt</b>
Gesetz zum autonomen Fahren - Ist die externe Überwachung autonomer Fahrsysteme mit dem Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr vereinbar?	2021	NZV 2021, S. 402 - 407	Die vom deutschen Gesetzgeber eingeführte Person der Technischen Aufsicht soll die Vereinbarkeit mit den völkerrechtlichen Vorgaben herstellen, indem der „Fahrer“ durch eine externe Aufsicht über das autonome Fahrsystem ersetzt werden soll. Sophie Gatzke zeigt in Ihrem Beitrag kritisch auf, ob das Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr eine solche Auslegung zulässt und weshalb der deutsche Gesetzgeber nicht zu schnell eine Vereinbarkeit annehmen sollte.
<b>Teilvorhaben: Virtuelle Haltestellen im Rahmen des automatisierten und vernetzten Fahrens für innovative Mobilitätsdienstleistungen</b>			
<b>Titel</b>	<b>Datum</b>	<b>Ort</b>	<b>Inhalt</b>
Comparison of safety and kinematic patterns of automated vehicles turning left in interaction with oncoming manually driven vehicles	2021	Transactions on Transport Sciences (TOTS) 12, Vol. 2/2021, pp. 1-12, Palacký University Olomouc. DOI: 10.5507/tots.2021.003, ISSN 1802-9876	Highly and fully automated driving has been under development for the past two decades in order to increase comfort, efficiency, and traffic safety. Particularly in the latter domain, experts agree on automated driving, especially in case of automated vehicles (AV) with SAE level 4 or higher, having the most promising effects. Automated driving is expected to decrease the number of seriously injured or even killed road users to zero (Vision Zero). However, automated driving is still in an early stage of development and many AV tend to drive very carefully to avoid crashes. So, the goal is to make driving more efficient while maintaining the highest level of safety. In the project “Digitaler Knoten 4.0” cooperative automated driving was assessed regarding efficiency and safety aspects. One of the use cases investigated was turn-ing left with oncoming traffic at an urban intersection as this situation represents one of the most complex situations in urban areas yielding to crashes with—in many cases—serious consequences for the involved

			<p>road users. At the Application Platform Intelligent Mobility (AIM) Re-search Intersection in Braunschweig, Germany, an SAE level 3 AV was turning left interacting with oncoming manually driven vehicles (MV). The performance of the AV was compared to MV executing the same manoeuvre. The recorded video-based trajectories of the respective AV as well as MV were analysed regarding the influence of situational factors (e.g. position of the vehicle in the queue and gap acceptance) and kinematic factors (e.g. speed and acceleration) on traffic safety. The similarities and differences between this specific AV and MV were identified yielding insight for further developing algorithms for more efficient driving while maintaining the same traffic safety level. For instance, it appears that the AV shows a very conservative left turn-ing behaviour leading to very safe PET distributions in comparison to left turning MV.</p>
Brunswick simulation scenario for virtual-stops based DRT service with SUMO	2021	10th International Congress on Transportation Research	<p>This paper presents a general simulation scenario with SUMO of the City of Brunswick, Germany, was set up using traffic network data from OSM and the traffic demand from TAPAS (TAPAS 2017). In this paper the developed simulation scenario is published for other researchers to use and extend. A simulation scenario has been set up and evaluated. The developed scenario includes a simulation of the whole city area of Brunswick. Furthermore, key performance indicators (KPIs) have been chosen to find optimal positions for virtual bus stops for autonomous shuttles. The simulation scenarios give findings of the effect of the position of a virtual bus stop on the traffic flow and the traffic safety. In combination with the walking time to this stop these KPIs give a decision basis for the position of the stop.</p>
How to Find My Ride? Results of an HCI Expert Workshop for AR-Aided Navigation	2021	In: Stephanidis C., Antona M., Ntoa S. (eds) HCI International 2021 - Late Breaking Posters. HCII 2021. Communications in Computer and Information	<p>In order to increase acceptance of automated mobility on-demand (AMoD) it is essential to provide high usability along the whole user journey. The user's challenges of getting to flexible pick-up locations and the</p>

		Science, vol 1498. Springer, Cham. <a href="https://doi.org/10.1007/978-3-030-90176-9_69">https://doi.org/10.1007/978-3-030-90176-9_69</a>	identification of the booked shuttle need to be addressed from a user-centered perspective. A workshop was conducted with HCI experts to create user-centered smartphone interface design solutions and elicit means of augmented reality (AR) for three scenarios: 1) navigation to the pick-up location, 2) identifying the pick-up location, and 3) identifying the SAV. Post-hoc fundamental AR information elements that provide users with high usability to overcome the aforementioned challenges were identified and visualized. Results of the workshop serve as a starting point to iteratively develop AR-aided user interfaces of virtual ride access points that cover the user journey of AMoD.
Evaluation of an AR-interface for effective and safe navigation to DRT pick-up locations	2021	33rd Conference on International Co-operation on Theories and Concepts in Traffic safety	First evaluation results of an AR-interface for effective and safe navigation to DRT pick-up locations
<b>Teilvorhaben: Erforschung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen als Bausteine innovativer Mobilitätslösungen</b>			
<b>Titel</b>	<b>Datum</b>	<b>Ort</b>	<b>Inhalt</b>
Methodological Distribution of Virtual Stops for Ridepooling	2022	Transportation Research Procedia 62 (2022) 442-449. DOI: <a href="https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.02.055">https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.02.055</a>	In recent years, an increasing number of shared and on-demand mobility services were deployed in several cities. Most of these services utilize virtual stops as pick-up and drop-off points due to a better service efficiency compared to a door-to-door operating policy. Virtual stops do not include any physical element of a conventional bus stop. Therefore, they are only visible on a mobile device with the proper application. Emerging from the flexibility of distributing virtual stops, strategic considerations are essential to optimize the service quality and usability. This work introduces three approaches to identify locations for virtual stops, followed by methodological strategies. Different characteristics are obtained by applying these methods, assessed by a comprehensive utility analysis regarding users' and providers' perspectives. The evaluation shows that for users, virtual stops located at streetlamps are the most

			advantageous. In contrast, providers benefit from virtual stops at intersections, mainly due to better routing efficiency.
Zulässigkeitsvoraussetzungen für den Betrieb autonomer Kraftfahrzeuge - Bringt das Gesetz zum autonomen Fahren Rechtssicherheit?	2022	NZV 2022, S. 62 - S. 68	Das Gesetz zum autonomen Fahren sollte weltweit erstmalig einen rechtssicheren Rahmen für die Etablierung von autonomen Fahrfunktionen auf deutschen Straßen schaffen. Diesen Anspruch untersucht Sophie Gatzke kritisch und zeigt auf, an welchen Stellen das Gesetz zum autonomen Fahren Rechtssicherheit schafft und in welchen Bereichen weitere Fragen und Unsicherheiten aufgeworfen werden.
<b>Teilvorhaben: Virtuelle Haltestellen im Rahmen des automatisierten und vernetzten Fahrens für innovative Mobilitätsdienstleistungen</b>			
<b>Titel</b>	<b>Datum</b>	<b>Ort</b>	<b>Inhalt</b>
Design and Field Test of a Mobile Augmented Reality Human-Machine Interface for Virtual Stops in Shared Automated Mobility On-demand. Electronics	In press	Electronics	Evaluation des AR-HMI der virtuellen Haltestelle

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel ViVre – Vernetzung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen für nachhaltige Mobilitätslösungen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Touko Tcheumadjeu, Louis Calvin; Thal, Silvia; Stürz-Mutalibow, Katrin; Harmann, Dennis; Yilmaz-Niewerth, Sefa; Rummel, Johannes; Lauermann, Jan; Hagemann, Willem; Wirtz, Boris; Koopmann, Björn Philipp; Schendzielorz, Tobias; Leschik, Claudia; Bosch, Esther Johanna; Grün, Felix; Jahns, Martina; Mellenthin, Pauline; Glaab, Julian; Bläsche, Jens; Kaul, Robert.	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30. Juni 2022
	6. Veröffentlichungsdatum Noch offen
	7. Form der Publikation TIB Hannover
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Linder Höhe, 51147 Köln Bliq GmbH, Mariendorfer Damm 1, 12099 Berlin AVL Software and Functions GmbH, Im Gewerbepark B29, 93059 Regensburg OECON Products & Services GmbH, Hermann-Blenk-Str. 22 a, 38108 Braunschweig OFFIS e.V., Escherweg 2, 26121 Oldenburg Schlothauer & Wauer GmbH, Ehrenbergstraße 20, 10245 Berlin Technische Universität Braunschweig, Universitätsplatz 2, 38106 Braunschweig	9. Ber. Nr. Durchführende Institution n/a
	10. Förderkennzeichen 01MM19014A 01MM19014B 01MM19014C 01MM19014D 01MM19014E 01MM19014F 01MM19014G
	11. Seitenzahl 120
	12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) Invalidenstraße 44 10115 Berlin
13. Literaturangaben 40	14. Tabellen 13
15. Abbildungen 62	
16. Zusätzliche Angaben n/a	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) n/a	
18. Kurzfassung Der wachsende Mobilitätsbedarf von Personen und Gütern stellt die innerstädtische Verkehrsinfrastruktur vor große Herausforderungen. Gleichzeitig steigert das erhöhte Aufkommen von Berufspendlern die Nachfrage nach einem bedarfsgerechten öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) sowie einer flexibleren Anbindung des ländlichen Raums. Langfristig ist daher eine Verlagerung des individuellen Fahrzeugverkehrs in Richtung intelligenter, moderner, emissionsarmer und nachhaltiger Mobilitätslösungen notwendig. Ziel des Projektes ViVre war die Vernetzung virtualisierter Verkehrsinfrastrukturen und automatisierter Fahrfunktionen für zentrale Verkehrsknoten, um damit Bausteine für innovative und nachhaltige Mobilitätslösungen zu entwickeln. Insbesondere wurden Konzepte für neue virtuelle Haltestellen erarbeitet, im Straßenverkehr umgesetzt und evaluiert. Dabei wurden neue Funktionen automatisierter vernetzter Fahrzeuge und virtualisierter Infrastruktur entwickelt. Dies umfasste insbesondere automatisierte und vernetzte Fahrfunktionen, die in einem komplexen städtischen Verkehrsnetz Distributionsfunktionen für virtuelle Bedarfshaltestellen nutzen und mit der Verkehrsinfrastruktur kommunizieren können. Für neue nachhaltige Mobilitätslösungen sind künftig flexible, bedarfsgerechte Haltestellen von zunehmender Bedeutung. Dabei kann die Digitalisierung und Virtualisierung von Verkehrsinfrastrukturelementen einen Beitrag leisten. Die von ViVre entwickelten innovativen Fahrzeugfunktionen, virtualisierten Verkehrsinfrastrukturen sowie optimierten Verkehrssteuerungen wurden in der Simulation sowie im realen Verkehr in der „Anwendungsplattform für Intelligente Mobilität“ (AIM) in Braunschweig erprobt. Hierbei befuhren die automatisierten und vernetzten Fahrzeuge Strecken in einem Mobilitätskorridor zwischen Hauptbahnhof und Flughafen, in dem nach Bedarf eine virtuelle Haltestelle eröffnet und vom Fahrzeug angefahren wurden. Ebenfalls wurden weitere Interaktionsszenarien der Fahrzeuge mit nicht-motorisierten Verkehrsteilnehmern und deren Bewältigung unter Einsatz virtueller Infrastrukturen betrachtet.	
19. Schlagwörter Virtuelle Bedarfshaltestellen, Virtualisierung und Digitalisierung von Verkehrsinfrastruktur, Mobilitätsdienstleistungen, Augmented-Reality Smartphone-APP, Dispositionssystem, ÖPNV-Priorisierung, automatisiertes und vernetztes Fahren, Testfeld AIM.	
20. Verlag n/a	21. Preis n/a

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planed	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title ViVre – Virtual stops for the automated traffic of the future	
4. author(s) (family name, first name(s)) Touko Tcheumadjeu, Louis Calvin; Thal, Silvia; Stürz-Mutalibow, Katrin; Harmann, Dennis; Yilmaz-Niewerth, Sefa; Rummel, Johannes; Lauermann, Jan; Hagemann, Willem; Wirtz, Boris; Koopmann, Björn Philipp; Schendzielorz, Tobias; Leschik, Claudia; Bosch, Esther Johanna; Grün, Felix; Jahns, Martina; Mellenthin, Pauline; Glaab, Julian; Bläsche, Jens; Kaul, Robert.	5. end of project 30/06/2022
	6. publication date tbd
	7. form of publication TIB Hannover
8. performing organization(s) (name, address) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Linder Höhe, 51147 Köln Bliq GmbH, Mariendorfer Damm 1, 12099 Berlin AVL Software and Functions GmbH, Im Gewerbepark B29, 93059 Regensburg OECON Products & Services GmbH, Hermann-Blenk-Str. 22 a, 38108 Braunschweig OFFIS e.V., Escherweg 2, 26121 Oldenburg Schlothauer & Wauer GmbH, Ehrenbergstraße 20, 10245 Berlin Technische Universität Braunschweig, Universitätsplatz 2, 38106 Braunschweig	9. originator's report no. n/a
	10. reference no. 01MM19014A 01MM19014B 01MM19014C 01MM19014D 01MM19014E 01MM19014F 01MM19014G
	11. no. of pages 120
12. sponsoring agency (name, address)  Federal Ministry for Digital and Transport (BMDV) Invalidenstraße 44 10115 Berlin Germany	13. no. of references 40
	14. no. of tables 13
	15. no. of figures 62
16. supplementary notes n/a	
17. presented at (title, place, date) n/a	
18. abstract The growing demand for mobility of people and goods poses major challenges for the inner-city transport infrastructure. At the same time, the increased volume of commuters increases the need for demand-oriented local public transportation (LPT) as well as more flexible connections to rural areas. In the long term, therefore, a shift in individual vehicle traffic toward intelligent, modern, low-emission and sustainable mobility solutions is necessary. The objective of the ViVre project was to connect virtualized traffic infrastructures and automated driving functions for central traffic nodes in order to develop building blocks for innovative and sustainable mobility solutions. Concepts for new virtual stops were developed, implemented in road traffic and evaluated. New functions of automated networked vehicles and virtualized infrastructure were developed. This included automated and connected driving functions that can use distribution functions for virtual on-demand stops in a complex urban traffic network and communicate with the traffic infrastructure. Flexible, demand-oriented stops will be of increasing importance for new sustainable mobility solutions in the future. The digitalization and virtualization of transport infrastructure elements can make a contribution here. The innovative vehicle functions, virtualized traffic infrastructures and optimized traffic controls developed by ViVre were tested in simulation and in real traffic at the "Application Platform for Intelligent Mobility" (AIM) in Braunschweig. Here, the automated and connected vehicles traveled routes in a mobility corridor between the main train station and the airport, where a virtual stop can be opened and approached by the vehicle as needed. Further vehicle interaction scenarios with non-motorized road users and their management using virtual infrastructures were also considered.	
19. keywords Virtual stops, virtualization of transport infrastructure, mobility services, augmented reality Smartphone application, disposition system, prioritisation of local public transport, automated and connected driving, Application Platform for Intelligent Mobility (AIM)	
20. publisher n/a	21. price n/a