

Technische Universität München

# FE70.970/2019

## Leistungssteigerung städtischer Straßennetze Schlussbericht

### **Autoren**

Dr.-Ing. Gabriel Tilg

Philipp Stüger, M.Sc.

Dr.-Ing. Matthias Spangler

Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München

Dr.-Ing. Gerhard Listl

gevas humberg & partner Ingenieurgesellschaft mbH

München - Karlsruhe

### **Auftraggeber**

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV)

Die dieser Veröffentlichung zugrundeliegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMDV unter FE-Nr. 70.0970/2019 im Rahmen des Forschungsprogramms Stadtverkehr (FoPS; [www.fops.de](http://www.fops.de)) durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt ausschließlich beim Autor.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Kurzfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Übergeordnete Aufgabenstellung und Zielsetzung .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Grundlagen .....</b>	<b>6</b>
3.1. Zielsetzung .....	6
3.2. Verkehrsflussmodellierung .....	6
3.3. Eigenschaften und Modellierung von automatisierten und vernetzten Fahrzeugen.....	8
3.3.1. Eigenschaften von AVF .....	9
3.3.2. Modellierung von AVF.....	16
3.3.3. Zusammenfassung .....	24
3.4. Wirkungen automatisierter und vernetzter Fahrzeuge auf Verkehrssysteme	25
3.4.1. Allgemeine Wirkungen .....	25
3.4.2. Verkehrsfluss: Außerorts .....	28
3.4.3. Verkehrsfluss: Innerorts .....	30
3.4.4. Zusammenfassung .....	36
3.5. Zukunftsszenarien für den automatisierten und vernetzten Verkehr .....	37
3.5.1. Basisszenario.....	39
3.5.2. Konservatives Szenario .....	40
3.5.3. Innovatives Szenario.....	40
3.5.4. Visionäres Szenario .....	41
3.5.5. Szenarioaspekte .....	42
<b>4. Verkehrstechnische Berechnungen.....</b>	<b>44</b>
4.1. Zielsetzung .....	44
4.2. Vorgehen .....	45
4.3. Auswahl der Streckenzüge.....	46
4.3.1. Identifikation repräsentativer sowie relevanter Infrastrukturelemente .....	46
4.3.2. Abgleich mit realen Infrastrukturelementen & Identifikation von Streckenzügen.....	51
4.4. Simulationsmodelle .....	55
4.4.1. Simulationssoftware .....	55
4.4.2. Eingangsdaten .....	56
4.4.3. Szenariomodellierung .....	59
4.4.4. Streckenzugsbezogene Szenarioevaluation .....	65
4.5. Analysierte Indikatoren.....	66
4.5.1. Fundamentaldiagramm .....	66
4.5.2. Sättigungsverkehrsstärken .....	67

4.5.3. Rückstaulänge.....	67
4.5.4. Ergebnisdaten in SUMO.....	68
4.6. Berechnung der Korrekturfaktoren .....	68
4.7. Modellanpassung an das HBS .....	69
4.8. Berechnungsergebnisse.....	71
4.8.1. Konservatives Szenario.....	71
4.8.2. Innovatives Szenario .....	75
4.8.3. Visionäres Szenario.....	85
4.9. Aussagekraft der Berechnungsansätze .....	88
<b>5. Befragung von Fachleuten.....</b>	<b>91</b>
5.1. Zielsetzung.....	91
5.2. Vorgehen .....	91
5.3. Modellierung von AVF in Simulationsszenarien.....	92
5.4. Wirkungen von AVF in den Regelwerken .....	93
<b>6. Ergebnissynthese.....</b>	<b>96</b>
6.1. Zielsetzung.....	96
6.2. Vorgehen .....	96
6.3. Kenngrößen des Verkehrsablaufs in der Simulation .....	97
6.4. Anpassungsbedarf des FGSV-Regelwerks .....	100
6.4.1. Theoretisch notwendige Anpassungen.....	100
6.4.2. Beispiel: Anbaufreie Hauptverkehrsstraße .....	109
6.5. Handlungsempfehlungen für Forschung und Praxis .....	114
6.5.1. Forschung .....	114
6.5.2. Praxis .....	117
<b>7. Zusammenfassung.....</b>	<b>119</b>
7.1. Zielsetzung.....	119
7.2. Vorgehensweise.....	119
7.3. Resultate.....	120
7.4. Vision .....	123
<b>8. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>124</b>
<b>9. Anhang.....</b>	<b>136</b>
9.1. Ergebnisse der Modellanpassung an das HBS.....	136
9.2. Fundamentaldiagramme .....	139

9.3. Korrekturfaktoren für Fundamentaldiagramme .....	140
9.4. Sättigungsverkehrsstärke für einen einzelnen Knotenpunkt .....	141
9.5. Interviewfragen .....	141
9.5.1. AA 3.1 Telematik.....	141
9.5.2. AA 3.3 Verkehrsbeeinflussung innerorts.....	142
9.5.3. AA 3.10 Theorie des Straßenverkehrs.....	142
9.5.4. AA 3.13 Theorie des Straßenverkehrs.....	143
9.6. Ergebniskatalog .....	143



# 1. Kurzfassung

Automatisierter und vernetzter Straßenverkehr kann erheblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit zukünftiger städtischer Straßennetze haben. Um den Möglichkeitsraum einzugrenzen und realistische Entwicklungen darzulegen, wurden in der vorliegenden Studie „Leistungssteigerung städtischer Straßennetze“ simulationsbasierte Untersuchungen durchgeführt. Dazu wurden zuerst vier Streckenzüge identifiziert, von denen drei in Ingolstadt und einer in München liegen. Sie beinhalten eine große Bandbreite von Infrastrukturelementen (verschiedene Knotenpunktgeometrien, Knotenpunktzufahrtstypen, ein- und mehrstreifige Streckensegmente, signalisierte und nicht signalisierte Knotenpunkte) und repräsentieren die reale städtische Infrastruktur gut. Daraufhin wurden die folgenden drei Zukunftsszenarien mit wesentlichen Unterscheidungsmerkmalen entwickelt und festgelegt:

- *Konservativ*: Durchdringungsgrad automatisierter und vernetzter Fahrzeuge (AVF) von 33 % ohne spezifische Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen,
- *Innovativ*: Durchdringungsgrad AVF von 66 % mit Sonderfahrstreifen für AVF,
- *Visionär*: Durchdringungsgrad AVF von 95 % mit verkehrsadaptiver Reinforcement-Learning-basierter Verkehrssteuerung.

Die Streckenzüge wurden alle mittels der Verkehrsflusssimulationssoftware SUMO (Simulation of Urban Mobility) (Lopez et al., 2018) modelliert und anhand realer Daten kalibriert. Bezüglich des Verhaltensmodells der Fahrer wurde auf Konformität mit dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) (FGSV, 2015a) geachtet und jene Verhaltensmodelle für AVF wurden dem CoExist-Projekt (CoExist Consortium, 2020) entnommen. Für jeden Streckenzug wurden die oben genannten geeigneten Szenarien simuliert.

Als Kenngrößen wurden die Verkehrsflüsse und –dichten, deren Zusammenhänge, sowie Sättigungsverkehrsstärken und Rückstaulängen evaluiert. Jedes Szenario wurde mit einem Basisszenario verglichen, welches den Ist-Zustand ohne AVF darstellt, um den jeweiligen Effekt auf die Leistungsfähigkeit des Streckenzugs untersuchen zu können. Im Falle des konservativen Szenarios wurden nur leichte Steigerungen der durchschnittlichen Verkehrsflüsse bzw. Kapazitäten beobachtet, die hauptsächlich auf die verringerten zeitlichen Abstände der AVF zurückzuführen sind. Im innovativen Szenario wurde

durch die zusätzliche Implementierung eines AVF-Sonderfahrstreifens kein positiver Einfluss auf die Verkehrsflüsse gegenüber dem Fahren im Mischverkehr automatisierter und konventioneller Fahrzeuge verzeichnet. Dies ist auf die erhöhten Konflikte und komplexe Interaktion in Knotenpunktbereichen zurückzuführen. Das bedeutet, dass solche Sonderfahrstreifen auf Basis anderer Argumente (z.B.: Verkehrssicherheit) implementiert werden müssten. Die Ergebnisse des visionären Szenarios zeigen, dass der hohe AVF-Durchdringungsgrad und die adaptive Reinforcement-Learning-basierte Verkehrssteuerung zusammen einen vergleichsweise starken positiven Einfluss auf den Verkehrsfluss haben. Der größere Effekt ist dabei auf die in diesem Szenario angenommene hohe Marktdurchdringung von AVF zurückzuführen.

Die Untersuchungsergebnisse stellen dar, dass bei hohen Durchdringungsgraden, einer entsprechenden Fahrdynamik automatisierter Fahrzeuge, sowie adaptiver LSA-Steuerung auf gleichbleibender Infrastruktur höhere Kapazitäten erreicht werden können. Dies könnte langfristig ermöglichen, heute für den motorisierten Individualverkehr reservierte Fahrstreifen umzuwidmen und anderen Verkehrsteilnehmern oder sonstigen Zwecken zur Verfügung zu stellen. In Zukunft sind jedoch weitere Feldtests und Simulatorstudien durchzuführen, um die der Untersuchung zugrundeliegenden Annahmen ggf. zu aktualisieren bzw. zu verifizieren.

Zusätzlich wurden Handlungsempfehlungen aus den Berechnungsergebnissen und ergänzenden Fachpersonbefragungen abgeleitet. Diskussionsgegenstand der Interviews waren die Berechnungsergebnisse sowie die Entwicklung des automatisierten und vernetzten Fahrens und die Abbildung entsprechender Effekte auf den Verkehrsablauf in den FGSV-Regelwerken. Die befragten Fachleute stimmen darin überein, dass der komplexe Zusammenhang von Automatisierung und Leistungsfähigkeit noch nicht abschließend geklärt ist und die Annahmen bzgl. der Parametrisierung der Simulationsmodelle einen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Es besteht aber Konsens, dass in Zukunft der Einfluss von AVF auf Kenngrößen des Verkehrsablaufs in Regelwerken zu berücksichtigen ist. Möglichkeiten hierzu sind die AVF-Effekte als Korrekturfaktor in das HBS zu übernehmen und in den FGSV-Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation (FGSV, 2006a) einen Abschnitt zur Modellierung von AVF hinzuzufügen. Generell wurde betont, dass die Regelwerke den IST-Stand der Technik abbilden und noch wesentlich mehr empirische AVF-Daten vonnöten sind, bevor Empfehlungen zur Parametrisierung und zu Korrekturfaktoren zum AVF in der Fortschreibung der Regelwerke berücksichtigt werden können.

Das F+E-Projekt bildet jedoch eine solide Grundlage für eine Fortschreibung, da es aufzeigt, welche Aspekte schwerpunktmäßig zu berücksichtigen sind (z.B.: Fundamentaldiagramme, Steuerungsverfahren). Des Weiteren wird auf Basis der Projektergebnisse deutlich, dass eine Zusammenarbeit mit Automobilherstellern essentiell ist, um geeignete Modelle für AVF in Verkehrsflusssimulationen zu erstellen.

Für den derzeitigen Stand der Datenlage zeigen die Projektergebnisse das Potential an Aussagekraft bezüglich der Effekte von AVF den urbanen Verkehrsablauf auf. Zukünftige Forschungsvorhaben sollten sich auf die Einbindung von Automobilherstellern in der Modellerstellung konzentrieren.

## 2. Übergeordnete Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Zukunft des städtischen Straßenverkehrs kann maßgeblich durch die Automatisierung und Vernetzung der motorisierten Fahrzeuge beeinflusst werden. Insbesondere die Leistungsfähigkeit vorhandener Straßennetze kann durch entsprechende Entwicklungen Gegenstand von Veränderung werden. Das Ziel des vorliegenden Projekts „Leistungssteigerung städtischer Straßennetze“, das im Rahmen des Forschungsprogramms Stadtverkehr (FoPS) im Auftrag des BMDV bearbeitet wurde, ist es, ebendiese möglichen Änderungen der Leistungsfähigkeit städtischer Straßeninfrastruktur auf Basis von mikroskopischen Verkehrsflusssimulation zu untersuchen. Zudem werden Handlungsempfehlungen zum Umgang mit dem Thema des Einflusses von AVF auf den Verkehrsablauf für Forschung und Praxis entwickelt. Dies ist notwendig, um langfristig zu ermöglichen, dass die Effekte der Automatisierung und Vernetzung auch in der Evaluation von Neu-, Aus- und Umbauvorhaben berücksichtigt werden können. Im Detail umfasst das Projekt drei inhaltliche Arbeitsschwerpunkte:

1. Im Zuge einer umfangreichen Recherche wird die existierende nationale und internationale Literatur zu mehreren relevanten Themenbereichen sowie die Ergebnisse von abgeschlossenen Forschungsprojekten analysiert. Dies umfasst die Eigenschaften von AVF und deren Modellierung, sowie deren Wirkungen auf Verkehrskenngrößen. Darauf basierend werden dann plausible Zukunftsszenarien für den städtischen Verkehrsablauf definiert. Diese Grundlagen sind in Kapitel 3 im Detail beschrieben.
2. Darauf aufbauend werden verkehrstechnische Berechnungen inklusive mikroskopischer Simulationen durchgeführt, um die Änderung der Leistungsfähigkeit in städtischer Umgebung für die jeweiligen Zukunftsszenarien abzuschätzen. Zusätzlich wird darauf basierend ein Vorschlag unterbreitet, wie jene Effekte in die Regelwerkswelt eingespeist werden können. Im Detail werden für Deutschland repräsentative Infrastrukturelemente identifiziert und basierend auf einem Abgleich dieser mit realer Infrastruktur entsprechende Streckenzüge ausgesucht. Für diese Streckenzüge werden daraufhin die zuvor definierten Zukunftsszenarien simuliert, ausgewertet und Korrekturfaktoren für Kennwerte berechnet, welche in den FGSV Regelwerken vorkommen. Das genaue Vorgehen sowie die Berechnungsergebnisse sind in Kapitel 4 beschrieben.

3. Schließlich werden in einem letzten Arbeitsschritt die Ergebnisse übergeordnet hinsichtlich des Zusammenhangs von Automatisierung und Leistungsfähigkeit interpretiert, sowie mit Mitgliedern der FGSV Gremien diskutiert. Anhand einiger spezifischer Kennwerte wird dann die mögliche Übertragung der Erkenntnisse in die Regelwerke dargestellt. Abschließend werden Handlungsempfehlungen entwickelt, die Vorschläge unterbreiten, um die Effekte von Automatisierung und Vernetzung des Straßenverkehrs auf die Leistungsfähigkeit städtischer Straßennetze weiter abzuschätzen und wie damit in der Praxis umgegangen werden kann. Die detaillierten Ausführungen sind in Kapitel 5 und 6 dargelegt.

## 3. Grundlagen

### 3.1. Zielsetzung

Das hier vorliegende Kapitel fasst die Ergebnisse der kontinuierlichen Grundlagenermittlung zusammen. Dafür wurde zu sämtlichen relevanten Themenbereichen eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Das automatisierte und vernetzte Fahren steht im Fokus der technischen Forschung und wird zunehmend auch in angrenzenden Forschungsbereichen untersucht. Daher finden sich zahlreiche Studien und Forschungsprojekte, die sich mit den

- Eigenschaften und der Modellierung bzw. Simulation von AVF,
- Wirkungen derer auf den Verkehr, insbesondere auf Verkehrskenngrößen, sowie
- Zukunftsszenarien für den automatisierten und vernetzten Verkehr und Prognosen des Durchdringungsgrads von AVF

beschäftigen. Diese drei Themenbereiche werden in den folgenden Abschnitten eingehend beleuchtet. Dabei wird auf nationale und internationale Forschung eingegangen, die sowohl in wissenschaftlichen Zeitschriften als auch in Form von eigenständigen Forschungsberichten publiziert wurde. Zusätzlich werde Projektberichte von geförderten Vorhaben sowie graue Literatur berücksichtigt.

Das Kapitel ist wie folgt gegliedert. Zuerst werden in Abschnitt 3.2 die Grundsätze der Verkehrsmodellierung eingeführt. Dann werden im Abschnitt 3.3 die Eigenschaften, sowie bestehende Modellierungsansätze von AVF zusammengestellt und aufbereitet. Der aktuelle Wissensstand zu möglichen Auswirkungen auf Verkehrssysteme mit Fokus auf den Verkehrsfluss werden in Abschnitt 3.4 analysiert. Schließlich werden basierend auf den gewonnen Erkenntnissen in Abschnitt 3.5 vier Szenarien definiert, deren Analyse einen Beitrag zum Wissensstand möglicher Leistungssteigerungen durch AVF in städtischen Netzen liefert.

### 3.2. Verkehrsflussmodellierung

Ein Modell beschreibt ein vereinfachtes, aber hinreichend genaues Abbild der Realität. Es bietet so die Möglichkeit, Aussagen zu treffen, ohne dafür aufwendige und kostenintensive Realversuche durchführen zu müssen. Für verkehrliche Fragestellungen finden

Modelle primär in Form von analytischen Berechnungen, als auch in detaillierten Verkehrsflusssimulationen Anwendung.

Ein grundlegendes Konzept der Verkehrsmodellierung ist das sogenannte Vier-Stufen-Modell. Dieser Ansatz besteht aus den vier Stufen *Verkehrserzeugung*, *Verkehrsverteilung*, *Verkehrsmittelwahl* und *Verkehrsumlegung*, welche im Anschluss kurz erklärt sind:

- *Verkehrserzeugung*: Auf Basis von räumlichen Strukturdaten wird das betrachtete Gebiet in Zonen eingeteilt. Dabei wird für jede Zone das Potential der Verkehrserzeugung anhand der Bevölkerungsanzahl, der Arbeitsplatzanzahl sowie der Anzahl anderer Nutzungseinrichtungen etc. berechnet. Als Ergebnis dieses Schrittes lassen sich für jede Zone ein Quell- und Zielverkehr berechnen.
- *Verkehrsverteilung*: In diesem Schritt werden die Quell- und Zielverkehre auf Basis von mathematischen Modellen miteinander verbunden. Dadurch können sogenannte Quelle-Ziel-Matrizen erstellt werden. Diese geben den gerichteten Verkehr von den jeweiligen Quellzonen zu den entsprechenden Zielzonen an.
- *Verkehrsmittelwahl*: Im dritten Schritt wird ggf. die Möglichkeit zur Verkehrsmittelwahl berücksichtigt. Auf Basis statistischer Modelle können die Quelle-Ziel-Matrizen unter Berücksichtigung der gewählten Verkehrsmittel bestimmt werden.
- *Verkehrsumlegung*: Im letzten Schritt werden die verkehrsmittelfeinen Quelle-Ziel-Matrizen auf das bestehende Verkehrsangebot umgelegt. Mittels mathematischer Verfahren können somit auf allen Straßen des Netzes Verkehrsstärken berechnet werden. Damit können schlussendlich auch Reisezeiten für die einzelnen Quelle-Ziel-Paare bestimmt werden.

Für den letzten Schritt, die Verkehrsumlegung, kommen sogenannten Verkehrsflussmodelle zum Einsatz. Hierbei werden mehrere Ansätze entsprechend ihrer Detailliertheit unterteilt, unter anderem in *mikroskopische*, *makroskopische* und *mesoskopische Modelle*.

*Mikroskopische Modelle* (Treiber & Kesting, 2013) betrachten Fahrzeug-Fahrer-Elemente und modellieren beispielsweise das Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselverhalten sowie taktische und strategische Routenwahl. Hierzu wurden im Laufe der Zeit verschiedenste Modellphilosophien entwickelt. Diese fokussieren sich dabei auf Sicher-

heitsabstände oder sog. Action-points, d.h. gewisse Punkte im Geschwindigkeits-Abstandsraum, an welchen Fahrer aktiv werden und die Geschwindigkeit drosseln oder erhöhen.

*Makroskopische Verkehrsflussmodelle* (Treiber & Kesting, 2013) entstammen der Fluid-dynamik und modellieren den Verkehrsfluss entsprechend dem Verhalten von Flüssigkeiten. Entsprechend werden dabei nur aggregierte Verkehrsgrößen wie etwa der Verkehrsfluss, die Verkehrsdichte und die durchschnittliche Geschwindigkeit betrachtet.

*Mesoskopische Modelle* (Treiber & Kesting, 2013) vereinen beide Modellwelten, indem sie zwar einzelne Fahrzeug-Fahrer-Elemente betrachten, die Fahrdynamik aber entsprechend makroskopischer Modelle (z.B.: nach der Warteschlangentheorie) modellieren.

Weitere Familien, wie etwa submikroskopische, nanoskopische oder auch hybride Modelle, existieren ebenfalls. Erstere berücksichtigen nicht nur Fahrzeug-Fahrer-Elemente, sondern zusätzlich das Zusammenspiel einzelner Fahrzeugelemente wie beispielweise die Kraftübertragung von Motor auf Reifen oder den Einfluss der Reifenstellung auf die Reibungskräfte. Hybride Modelle kombinieren Elemente aus den anderen Modellfamilien. So können zum Beispiel einzelne Fahrzeuge wie Lastkraftwagen mikroskopisch, die restlichen Fahrzeuge aber makroskopisch modelliert werden. Diese beiden Modelle spielen jedoch nur in speziellen Fällen eine Rolle.

### 3.3. Eigenschaften und Modellierung von automatisierten und vernetzten Fahrzeugen

Die prognostizierten Eigenschaften von AVF hängen stark vom jeweiligen Automatisierungsgrad und den zugeordneten Fahrerassistenzsystemen (FAS) ab. Generell wird jedoch davon ausgegangen, dass sich das longitudinale und laterale Fahrverhalten der Fahrzeuge im Vergleich zu von Menschen gesteuerten Fahrzeugen verändert. Dabei spielt die wegfallende Stochastik in der Aktorik sowie die auf Sensorik basierende Umfelderkennung und -wahrnehmung eine große Rolle. Zudem sind die Einhaltung der Verkehrsordnung, sowie die Vernetzung und Kooperation wichtige Eigenschaften von AVF. Die letztgenannten Aspekte beziehen sich auf die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur oder anderen Fahrzeugen sowie die daraus entstehenden Möglichkeiten zur Abstimmung der Fahrweise und Steuerung. Diese Aspekte werden in den Abschnitten 3.3.1.1 bis 3.3.1.6 im Detail erläutert.

Da sich die Technologie des AVF noch in der Entwicklung befindet und im Realumfeld nur im kleinen Rahmen zu Forschungs- und Entwicklungszwecken existiert, muss das Fahrverhalten von automatisierten Fahrzeugen (AF) modelliert werden, um entsprechende Simulationsstudien durchführen zu können. Hierdurch wird es ermöglicht, schon heute Aussagen über die gesamtverkehrlichen Auswirkungen von AVF treffen zu können. Dafür werden in Abschnitt 3.3.2.1 die Anforderungen an die Modellierung beleuchtet, sowie passende Modellansätze in den Abschnitten 3.3.2.2 bis 3.3.2.5 vorgestellt. Abschließend wird die herausfordernde Thematik der Kalibrierung und Validierung beleuchtet (Abschnitt 3.3.2.6).

### 3.3.1. Eigenschaften von AVF

#### 3.3.1.1. Stufen der Automatisierung

International wurden sechs Stufen der Automatisierung durch die Society of Automotive Engineers definiert (SAE On-Road Automated Vehicle Standards Committee, 2014). Diese reichen von „Keiner Automatisierung“ bis zur „Vollautomatisierung“. Auf nationaler Ebene wurde in Anlehnung daran eine Einstufung mit ebenfalls sechs Ebenen vorgeschlagen, welche nur geringfügig von der internationalen Klassifizierung abweicht. In diesem Bericht wird sich auf die nationale Klassifizierung (BMVI, 2015; Gasser et al., 2012; VDA, 2015) bezogen. Die zugehörigen Stufen sind in Abbildung 1 dargestellt und deren Bedeutungen erläutert.

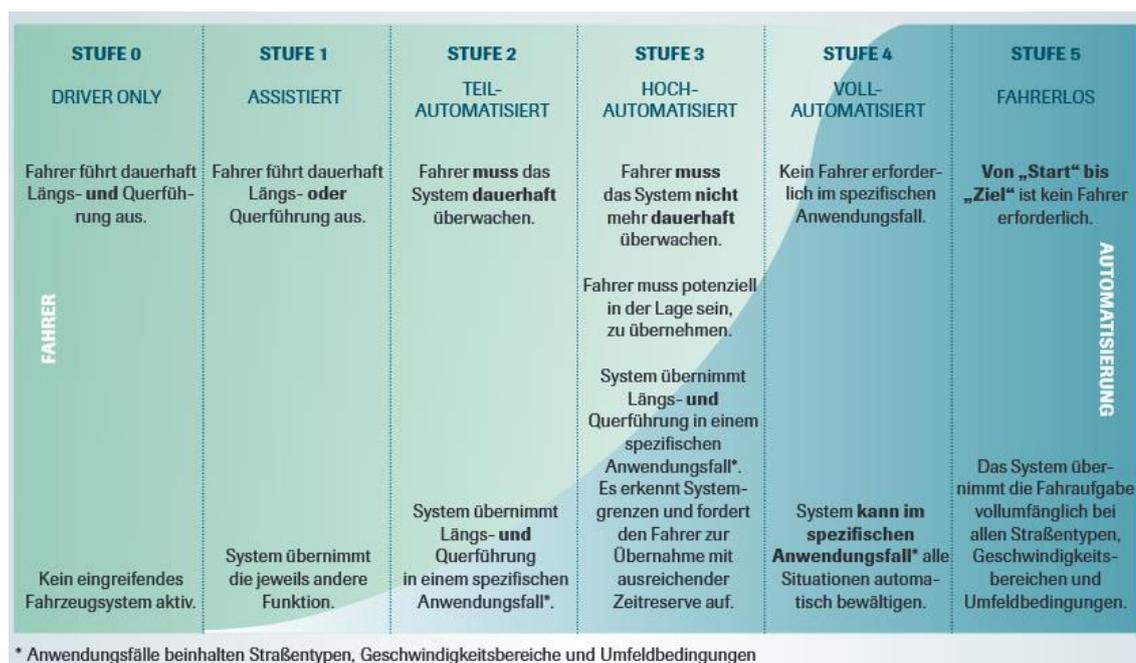


Abbildung 1: Automatisierungsstufen nach (BMVI, 2015; Gasser et al., 2012; VDA, 2015).

Jede der Stufen suggeriert auf den ersten Blick eine klare Verteilung der Verantwortlichkeiten zwischen Fahrer und Fahrzeug. In (Gasser et al., 2012) werden die Stufen wie folgt definiert. Stufe 0 ("Driver Only") bedeutet, dass der menschliche Fahrer die volle Verantwortung für alle Aspekte des Fahrens inklusive Längs- und Querführung trägt. Stufe 1 ("Assistiert") ist dadurch definiert, dass der Fahrer dauerhaft nur noch entweder die Längs- oder die Querführung übernimmt. Die jeweils andere Fahrfunktion wird vom System innerhalb nicht allgemein definierter Grenzen ausgeführt. Jedoch muss das System durch den Fahrer überwacht werden, welcher jederzeit dazu bereit sein muss, die vollständige Kontrolle zu übernehmen. Ein Beispiel hierfür wäre die automatisierte Abstandsregelung, welche auf Autobahnen sinnvoll einsetzbar ist. In der zweiten Stufe („Teilautomatisiert“) können Längs- und Querführung zugleich vom System übernommen werden. Der Fahrer muss immer noch überwachen und bereit sein, die Fahrzeugführung vollständig zu übernehmen. Hier kann zusätzlich zur automatischen Abstandsregelung ein Spurhalteassistent aktiv sein. In Stufe 3 („Hochautomatisiert“) muss der Fahrer das System für den spezifischen Anwendungsfall nicht mehr dauerhaft überwachen. Der Fahrer wird aktiv zur Übernahme der Kontrolle aufgefordert, wenn das System die Systemgrenzen erkennt. Ein solcher Anwendungsfall könnte beispielsweise das Fahren auf der Autobahn sein und das Fahrzeug übernimmt eigenständig sowohl die Geschwindigkeitsregelung als auch die Spurführung. In Stufe 4 („Vollautomatisiert“) muss das System für spezifische Anwendungsfälle nun nicht mehr überwacht werden. In den definierten Anwendungsfällen ist das System stets in der Lage, das Fahrzeug in den risikominimalen Zustand zurückzuführen. Der Fahrer wird mit genügend Vorlaufzeit zur Übernahme der Fahrzeugkontrolle aufgefordert, falls der Anwendungsfall verlassen wird. Die finale Stufe 5 beschreibt den Zustand, in dem die Vollautomatisierung für alle Anwendungsfälle gilt (VDA, 2015).

### 3.3.1.2. Fahrerassistenzsysteme

Den verschiedenen Automatisierungsstufen können FAS und mögliche Einführungszeiträume zugeordnet werden (siehe Abbildung 2).

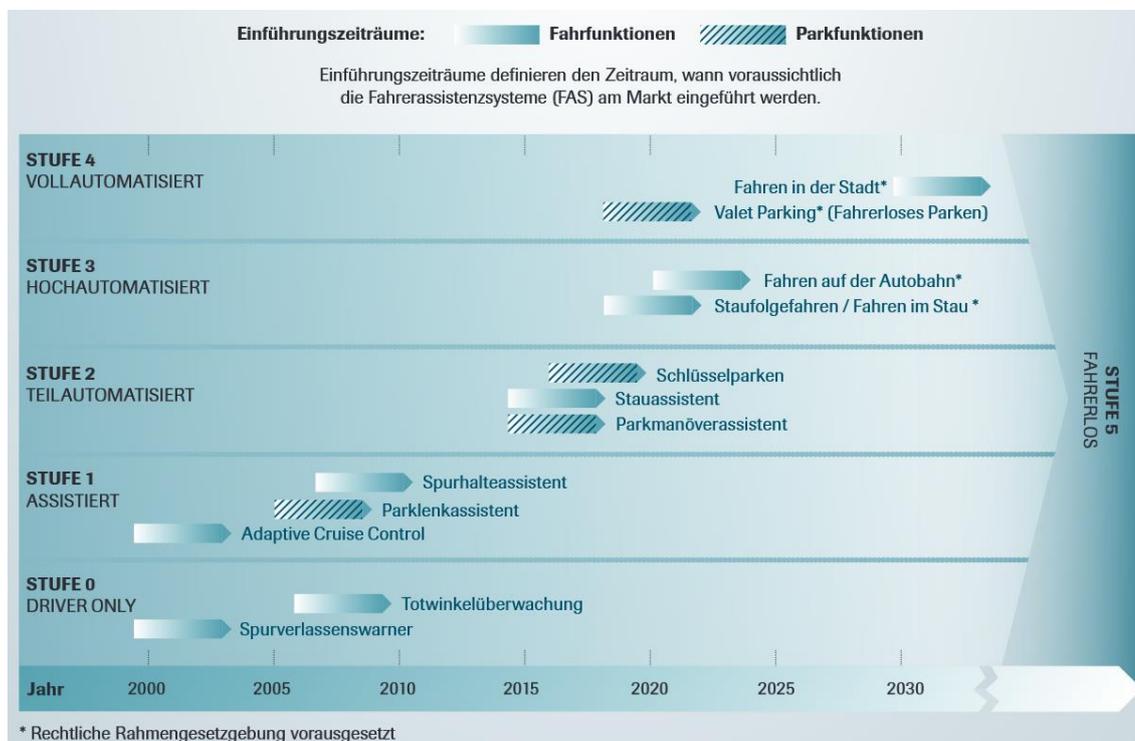


Abbildung 2: Zuordnung der FAS zu den Automatisierungsstufen (VDA, 2015).

Nach (VDA, 2015) werden diese nach dem Grad ihrer Assistenz bzgl. Parken und Fahren unterteilt.

Auch (Winner, Hakuli, Lotz, & Singer, 2009) beschreiben Einparkassistentensysteme separat. Parkfunktionen beinhalten unter anderem den Parkmanöverassistenten, den Parklenkassistenten und das fahrerlose Parken. Unterstützt wird der Fahrer auch beim Erkennen einer ausreichend großen Parklücke.

Zu den Fahrassistenten gehören nach (VDA, 2015) das automatische Notbremsen, die Verkehrszeichenerkennung, der Spurverlassenswarner, die Totwinkelüberwachung, das adaptive Kurvenlicht, Abstandsregeltempomat (engl. *Adaptive Cruise Control*, ACC), der Spurhalteassistent, der Stauassistent, Staufolgefahren sowie schließlich das automatisierte Fahren auf der Autobahn und in der Stadt. (Winner et al., 2009) führen die Kategorien kooperatives ACC (CACC), Frontkollisionsschutzsysteme, Sichtverbesserungssysteme, Fahrdynamikregelung mit Brems- und Lenkeingriff und bremsenbasierte Assistenzfunktionen ein.

Zusammengefasst existieren also FAS zu Parkmanövern sowie zur Längs- und Quersteuerung des Fahrzeugs während der Fahrt, mit dem Ziel Komfort und Sicherheit zu erhöhen. Beschreibungen von existierenden FAS der Fahrzeuge deutscher Autobauer lassen sich ebenso in diese Kategorien einordnen.

Die potenziellen Wirkungen dieser FAS sowie der Automatisierung für das Fahrverhalten sind zahlreich. Neben der verbesserten Kontrolle der longitudinalen und lateralen Manöver aufgrund der Übernahme der Längs- und Quersteuerung durch das Fahrzeug wird auch die Varianz im Fahrverhalten stark verringert. Systeme wie der Abstandsregler und der Spurhalter führen dazu, dass zum Beispiel während des Fahrzeugfolgevorgangs geringere Schwankungen (Oszillationen) des Fahrzeugfolgeabstands erwartet werden, als dies bei menschlichen Fahrern der Fall ist (Olstam et al., 2020). Durch die Übernahme der Geschwindigkeits- und Abstandskontrolle durch FAS bei höheren Automatisierungsstufen kann davon ausgegangen werden, dass dabei, in Abgrenzung zu menschlichen Fahrern, die Straßenverkehrsordnung ausnahmslos beachtet wird. Zudem besteht ein Unterschied in der Wahrnehmung von Objekten und Personen zwischen AVF und menschlichen Fahrern. Die Latenzzeit zwischen der Detektion und der Umsetzung einer Aktion ist bei automatisierten Fahrzeugen deutlich geringer als bei menschlichen Fahrern (Krause et al., 2017). Andererseits besitzen AVF zugleich nicht das Antizipationsvermögen des Menschen, welches in bestimmten Situationen vorteilhaft ist. Diesem Nachteil kann durch die Vernetzung von Fahrzeugen entgegengewirkt werden, welche darüber hinaus weitere Kommunikation und Kooperationsformen erlaubt und so gravierende Einflüsse auf das Fahrverhalten der Fahrzeuge haben und den Verkehrsfluss substantiell positiv beeinflussen kann.

### 3.3.1.3. Longitudinales und laterales Fahrverhalten

Das longitudinale Fahrverhalten wird durch das Halten des Sicherheitsabstandes, die Beschleunigung bei freier Fahrt, das notwendige Bremsen und weiteren ähnlichen Aktionen gekennzeichnet. Dieses Verhalten hängt bei menschlichen Fahrern stark von der Fahrweise ab. AVF können hier durch die systemgesteuerte Abstands- und Geschwindigkeitsregelung signifikante Unterschiede zu menschlichen Fahrern aufweisen. FAS wie ACC sind bereits heute im Einsatz und belegen dies (Milanés & Shladover, 2014). Darauf basierend wurde das CACC (z.B. (Milanés & Shladover, 2014; Van Arem, Van Driel, & Visser, 2006) entwickelt, welches durch das Kommunikationsmodul große Vorteile in Bezug auf die sogenannte String-Stabilität (Stabilität von Fahrzeugkolonnen) hat.

Diese Stabilität gibt an, wie stark sich Störungen innerhalb einer Fahrzeugkolonne ausbreiten. Dies ist von großer Relevanz für die Steigerung der Verkehrsflusseffizienz.

Zusätzlich unterstützen bzw. übernehmen verschiedene FAS die Aufgabe des Spurhaltens. Dies kann zu verbesserten Verkehrsflüssen führen, da etwaige für andere Fahrer irritierende Manöver innerhalb einer Spur reduziert werden. Die durchgeführten Fahrstreifenwechsel können dank der entsprechenden Assistenten sicherer werden. Den größten Einfluss wird jedoch die Vernetzung der Fahrzeuge mit sich bringen, da diese dazu führen kann, dass geringere Zeitlücken für Fahrstreifenwechsel akzeptiert werden und diese insgesamt effizienter und häufiger durchgeführt werden können. Eine solche Kommunikation und Kooperation von Fahrzeugen kann an Orten mit hoher Fahrstreifenwechselhäufigkeit, wie beispielsweise in Ein- und Ausfahrten, sowie Verflechtungsbereichen auf Autobahnen von Wichtigkeit für den effizienten Verkehrsfluss sein.

#### 3.3.1.4. Wahrnehmung und Aktorik

Die Wahrnehmung von AVF und Menschen ist grundlegend verschieden. Während erstere auf die technische Sensorik angewiesen sind, sind Menschen durch ihre physischen und kognitiven Fähigkeiten begrenzt. Die Sensorik der AVF hat der menschlichen Wahrnehmung gegenüber Vorteile, wenn es zum Beispiel um die Signalverarbeitung geht, jedoch hat auch diese eine begrenzte Reichweite (Atkins, 2016; Talebpour & Mahmassani, 2016). Des Weiteren gehen viele Studien davon aus, dass die Reaktionszeit drastisch reduziert wird (Krause et al., 2017; Levin & Boyles, 2016). Zudem kann die Sensorik viele Personen und Objekte zugleich wahrnehmen und verarbeiten, während die Sinne des Menschen limitiert sind. Einige Nachteile der Wahrnehmung des Menschen werden jedoch ausgeglichen durch deren Antizipationsfähigkeit. Aufgrund von Erfahrung können Menschen manche Situationen meistern, da sie gewisse Vorgänge im Vorhinein antizipieren können. AVF sind dabei auf Prognosen, basierend auf mathematischen Algorithmen, angewiesen.

Die unterschiedliche Wahrnehmung, aber auch die darauf basierende Aktorik ist bei Mensch und Maschine grundlegend verschieden. Dies zeigt sich zum Beispiel im Fahrverhalten, sei es in longitudinaler oder lateraler Richtung, welches bei Menschen stark variieren kann. Bei AVF ist davon auszugehen, dass die Variabilität im Vergleich zum menschlichen Fahrverhalten, die abhängig von Kultur, Geschlecht, Alter, rechtlichen Rahmenbedingungen, sowie spezifischen Situationen ist, stark reduziert wird. Positive Sicherheitseffekte hätte dies z.B. auf das Fahrverhalten junger Männer, denen eine überdurchschnittlich aggressive und risikoreiche Fahrweise zugesprochen wird, welche sich

auch in Unfallstatistiken widerspiegelt (Statistisches Bundesamt, 2018). Erste Datenanalysen aus Feldversuchen zeigen, dass Geschwindigkeitsverläufe beim Anfahren sehr deterministisch sind, und Abstands- und Geschwindigkeitsoszillation während des Folgens sehr gering sind (Olstam et al., 2020). Auch (Atkins, 2016) hält fest, dass AVF andere Beschleunigungs- und Bremsprofile mit geringerer Variabilität haben werden.

### 3.3.1.5. Rahmenbedingungen aus der Verkehrsordnung

Unter der Annahme, dass Fahrzeughersteller für Unfälle haften, vermuten (Olstam et al., 2020), dass AVF die gesetzlichen Rahmenbedingungen einhalten werden, da nur dann Versicherungsschutz gegeben sein kann. Beim derzeitigen Stand der Technik können FAS noch vom Fahrer übersteuert werden und somit z.B. Höchstgeschwindigkeiten trotz Tempomat überschritten werden. Für das Fahrverhalten im urbanen Raum relevant sind hierfür vor allem Geschwindigkeitsbegrenzungen, sowie das Einhalten der Vorgaben entsprechend der Verkehrszeichen und Lichtzeichen an signalisierten Knotenpunkten, und der Sicherheitsabstände zum vorausfahrenden Fahrzeug. Gerade Letzteres wird selten eingehalten. Da geringere Abstände zu höheren Verkehrsflüssen führen, könnte der Umstand, dass AVF diese Sicherheitsabstände einhalten werden, in bestimmten Situationen negative Einflüsse auf die Kapazitäten haben (Wagner, 2016). Daher ist es wichtig, diesen Einfluss zu berücksichtigen.

### 3.3.1.6. Vernetzung und Kooperation

Einer der wichtigsten Aspekte von AVF ist die Vernetzung und die dadurch entstehende Möglichkeit zur systematischen und effizienten Kommunikation und Kooperation. Ein konsequent kooperatives Fahren kann sowohl Vorteile auf der Nutzer- als auch auf der Systemebene bringen (Atkins, 2016). Heute ist dies bis auf vereinzelte Kommunikation mittels Gesten oder Kooperation bei bestimmten Fahrmanövern für menschliche Fahrer nicht in systematischer Art und Weise möglich. Auch AF ohne Vernetzung sind durch die Reichweite und Interpretationsfähigkeiten ihrer optischen Sensorik beschränkt.

Ein hoher Grad an Vernetzung bringt sowohl aus der Komfort- und Sicherheitsperspektive, als auch insbesondere unter Effizienzgesichtspunkten Vorteile (Protzmann, Radosch, Festag, Fritzsche, & Rehme, 2018). So ermöglicht eine höhere Informationsdichte unter anderem eine vorausschauende Fahrweise, Fahren im Pulk, und intelligentere Routenwahl. Hierfür ermöglicht Fahrzeugkommunikation nicht nur den Informationsaustausch mit anderen Fahrzeugen, sondern auch mit Infrastrukturelementen sowie

(meist cloudbasierten) Dienstleistungen wie beispielsweise Verkehrsinformationen (Katsaros & Dianati, 2016; Schmidt-Eisenlohr, 2010).

Für die Realisierung einer Kommunikation und Kooperation zwischen Fahrzeugen bzw. Verkehrsteilnehmern kommen vor allem zwei Technologien in Betracht. Hierbei handelt es sich um spezielle Erweiterungen schneller Mobilfunkstandards (Cellular-V2X) oder WLAN-basierter Kommunikation (basierend z.B. auf den Standards IEEE 802.11p bzw. ITS-G5). Diese Verfahren verfügen nicht nur über eine hohe Bandbreite, sondern zusätzlich auch kurze Latenzzeiten, was eine Datenübertragung mit minimaler Verzögerung ermöglicht und so unter anderem teleoperiertes Fahren möglich macht. Neben diesen beiden Technologien besteht zusätzlich die Möglichkeit der Nutzung konventioneller Mobilfunkverbindungen. Hier findet der Datenaustausch dann ausschließlich über Datenzentralen von Automobilherstellern, Dienstleistern oder regulierenden Akteuren statt. Ein direkter Informationsaustausch ohne eine zentrale Instanz ist hier nicht möglich. Für weitere detaillierte Informationen zu den jeweiligen Technologien wird an dieser Stelle auf eine Publikation von (Protzmann et al., 2018) verwiesen. Bis zur Veröffentlichung dieses Berichts konnte sich kein internationaler Standard final durchsetzen. Ein EU-interner Vorstoß der Europäischen Kommission zur Verständigung auf ITS-G5 wurde im Juli 2019 vom Europäischen Rat zurückgewiesen (5G Automotive Association e.V, 2019; Europäische Kommission, 2019).

Die Begriffsdefinitionen innerhalb dieses Projekts folgen aktuellen Publikationen der 5G Infrastructure Public Private Partnership, einer Initiative der Europäischen Kommission und europäischer Industrie (Redana et al., 2019). Als allgemeiner Oberbegriff für Fahrzeugkommunikation wird V2X (engl. *Vehicle-to-Everything*) verwendet, welcher sich in vier Kategorien aufschlüsseln lässt. Bei der V2V-Kommunikation (engl. *Vehicle-to-Vehicle*) verständigen sich Fahrzeuge untereinander und tauschen Informationen wie Statusinformationen, Warnungen und weitere Informationen aus. Die zweite Kategorie, Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation (V2I, engl. *Vehicle-to-Infrastructure*), umfasst die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur. Hierbei tauschen Fahrzeugkommunikationseinheiten (engl. *Onboard Units*) Informationen mit infrastrukturseitigen RSUs (engl. *Roadside Units*) aus. Derartige RSUs können spezifische Informationen wie die Position von Baustellenabsicherungen oder aktuelle Lichtsignalanlagen-Signalzustände übermitteln. RSUs können außerdem als Anbindungspunkt zu weiteren (cloud-basierten) Services dienen. V2P (engl. *Vehicle-to-Pedestrian*) ermöglicht die direkte Kommunikation mit Fußgängern. Neben diesen direkten Kommunikationswegen (z.B. von Fahrzeug zu Fahrzeug) über Cellular-V2X oder ITS-G5 steht auch die Nutzung des

konventionellen Mobilfunknetzes zur Verfügung. Dieser Kommunikationsweg wird unter V2N (engl. *Vehicle-to-Network*) zusammengefasst und benötigt dann eine Backend-Infrastruktur, welche empfangene Informationen verarbeitet und an die Fahrzeuge zurücksendet.

Die vorgestellten Kommunikationstechnologien ermöglichen bei entsprechender Ausstattung die gleichzeitige Nutzung sämtlicher V2X Kategorien in beide Kommunikationsrichtungen. Auf eine Unterscheidung in beispielsweise V2I und I2V wird deshalb verzichtet.

V2X-Kommunikation wirkt sich neben den bereits erwähnten Eigenschaften auch noch über eine zweite Ebene auf den Verkehrsablauf aus: So verhilft das Nutzen von vernetzten Fahrzeugen als Datenlieferanten zu einer deutlich verbesserten Informationslage und erhöht so indirekt die Effizienz von verkehrssteuernden Maßnahmen und Echtzeitnavigation (Schmidt-Eisenlohr, 2010).

### **3.3.2. Modellierung von AVF**

Im vorigen Abschnitt wurden die wichtigsten Eigenschaften von AVF und die entsprechenden Unterschiede zu den Eigenschaften menschlicher Fahrer beleuchtet. Im nächsten Schritt werden daraus Anforderungen an die Modellierung von AVF abgeleitet (Abschnitt 3.3.2.1). Daraufhin werden die existierenden Publikationen zu Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodellen für AVF (Abschnitt 3.3.2.2 und 3.3.2.3), zur Modellierung von Vernetzung und Kooperation (Abschnitt 3.3.2.4), sowie zur Behandlung der Automatisierungsstufen in Modellen (Abschnitt 3.3.2.5) untersucht. Abschließend wird die Herausforderung der Kalibrierung und Validierung im Zusammenhang mit AVF (Abschnitt 3.3.2.6) analysiert.

#### **3.3.2.1. Anforderungen an die Modellierung**

Obwohl auch makroskopische Ansätze zur Modellierung von AVF existieren (z.B. (Levin & Boyles, 2016)), liegt der Fokus in diesem Forschungsprojekt auf der mikroskopischen Modellierung. Diese eignet sich per Definition am besten, um Fahrmanöver einschließlich der Interaktionen zwischen AVF und konventionellen Fahrzeugen sowie fahrzeugspezifische Unterschiede zu modellieren und herauszuarbeiten. Die mikroskopische Modellierung erlaubt es zudem die Interaktion motorisierter Fahrzeuge mit nicht-motorisierten Verkehrsteilnehmern wie Fahrradfahrern und Fußgängern, vor allem auf nicht gesi-

cherten Verkehrsflächen, wie z.B. nicht signalisierten Knotenpunkten oder Fußgängerquerungen, zu berücksichtigen. Diese Interaktionen können neben der Interaktion zwischen Fahrzeugen für den Verkehrsfluss ebenfalls maßgeblich werden. Diese Aspekte sind auch Gegenstand aktueller Forschung (CoEXist Consortium, 2020; Lehrstuhl für Verkehrstechnik (TUM), 2019), da insbesondere im urbanen Umfeld eine Vielzahl verschiedener Verkehrsteilnehmer aufeinandertreffen.

Die etablierten mikroskopischen Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodelle wurden jedoch entwickelt, um das Verhalten menschlicher Fahrer realistisch abzubilden. AVF, die durch technische Systeme geführt werden, agieren jedoch anders als menschliche Fahrer. (Olstam et al., 2020) hält fest, dass es aus verkehrstechnischer Sicht ausreichend ist, den Einfluss von FAS auf das Fahrverhalten zu modellieren und nicht die einzelnen FAS selbst. In diesem Sinne wird der Fokus der folgenden Untersuchung auf die zuvor zusammengestellten resultierenden Eigenschaften von AVF gesetzt und im Allgemeinen nicht mehr auf Auswirkungen einzelner FAS eingegangen. Die betrachteten Eigenschaften sind das Fahrverhalten, Wahrnehmung und Aktorik, Einhaltung der Verkehrsordnung sowie die Vernetzung und Kooperation.

Das longitudinale Fahrzeugverhalten wird mit sogenannten Fahrzeugfolgemodellen mathematisch beschrieben. Die existierenden konventionellen Modelle wurden entwickelt, um das menschliche Fahrverhalten abzubilden. Diese Modelle müssen nun befähigt werden, die erhöhte Stabilität und Adaptivität automatisierter Fahrzeuge abbilden zu können. Zudem muss berücksichtigt werden, dass das Fahrzeugfolgeverhalten zusätzlich davon beeinflusst wird, ob das folgende Fahrzeug, und jenem dem gefolgt wird, durch einen menschlichen Fahrer gesteuert wird oder ob es ein AVF ist. Ein menschlicher Fahrer wird sich beispielsweise anders verhalten, wenn er einem automatisierten Fahrzeug folgt, da dessen Aktionen vorhersehbarer sind. Des Weiteren muss eine etwaige Vernetzung und Kooperation zwischen den Fahrzeugen abgebildet werden. Sollte beispielweise keine Vernetzung vorliegen (um z.B. frühzeitig über Geschwindigkeitsänderungen des vorderen Fahrzeugs zu informieren), müssen AF einer konservativen Fahrweise folgen, die aus dem rechtlichen Rahmen resultiert. (Olstam et al., 2020)

Die Modellierung des lateralen Verhaltens muss potentiell verringerte akzeptierte Zeitlücken berücksichtigen können. Aspekte wie das verbesserte Spurhalten sind in Modellen per se berücksichtigt, da die lateralen Dimensionen meistens nur spurgenaue modelliert werden. Zweidimensionale Modelle (z.B. (Chen, Treiber, Kanagaraj, & Li, 2018; Helbing

& Molnár, 1995)) finden bisher nur bei der Modellierung von Fußgängern oder Radfahrern Anwendung, bzw. werden in Forschungsprojekten experimentell auch für motorisierte Fahrzeuge entwickelt (Rudloff, Schönauer, & Fellendorf, 2013).

Die veränderte Wahrnehmung und die Prognosefähigkeiten von AVF soll modellierbar sein. So kann zum Beispiel die Anzahl an Fahrzeugen, die bei der Wahl der aktuellen Beschleunigung erkannt und miteinbezogen wird, eingegrenzt werden, um vorausschauendes Fahren zu modellieren. Dennoch müssen auch Limitationen, die aus der Sensorik folgen, berücksichtigt werden, wenn z.B. die Sicht von Kamerasensoren verdeckt ist (Olstam et al., 2020). Ein sehr wichtiger Aspekt ist die deterministische Fahrweise von AVF (Olstam et al., 2020). Um diesen Aspekt berücksichtigen zu können, müssen entsprechend kalibrierbare Parameter im Modell vorhanden sein.

Die Einhaltung gesetzlicher Parameter ist in allen bereits existierenden Modellen gegeben.

### 3.3.2.2. Fahrzeugfolgemodelle und AVF

Im Laufe der Zeit haben sich etliche Forscher darin bemüht, das menschliche Fahrverhalten mittels sogenannter Fahrzeugfolgemodelle mathematisch zu beschreiben. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Zusammenhang zwischen dem Abstand vom eigenen Fahrzeug zum vorausfahrenden Fahrzeug und der eigenen Geschwindigkeit. Bekannte und weit verbreitete Modelle sind jene von Gipps (Gipps, 1981), Wiedemann 74 und 99 (Wiedemann, 1974), Krauß (Krauß, 1998) sowie das Intelligent Driver Model (IDM) (Treiber, Hennecke, & Helbing, 2000).

Im Zusammenhang mit AVF wurden in den meisten Studien entweder das IDM oder das *MICrosopic model for Simulation of Intelligent Cruise control* (MIXIC) verwendet (Do, Rouhani, & Miranda-Moreno, 2019). Erweiterungen des IDM wurden bereits in Feldstudien zum automatisierten Fahren eingesetzt (Kesting, Treiber, Schönhof, Kranke, & Helbing, 2007; Kranke & Poppe, 2008). Das IDM war die Basis für Modelle, um ACC und CACC (Milanés & Shladover, 2014; Xiao, Wang, Schakel, & van Arem, 2018; Xiao, Wang, & Van Arem, 2017) abbilden zu können. Andere Modelle für die Abbildung des ACC sind ebenso bekannt (Winner et al., 2009). Eine zusätzliche Erweiterung des IDM ist das IDM+ (Schakel, Van Arem, & Netten, 2010), welche z.B. in (Calvert, Schakel, & van Lint, 2017) angewandt wird. Das zweite weit verbreitete Modell, MIXIC, wurde von (van Arem, de Vos, & Van der Schuren, 1997; Van Arem et al., 2006) explizit für die Modellierung von AVF entwickelt. Das Modell wurde in (Talebpour & Mahmassani, 2016)

weiterentwickelt, um die Reichweite der Sensorik im Modell berücksichtigen zu können. Beide Modelle, das IDM und das MIXIC, fanden primär in Studien Anwendung, welche sich meist auf den Verkehr auf Autobahnen beziehen. Eine Übersicht dazu befindet sich in (Do et al., 2019).

Ebenso wurde das Wiedemann 99 – Modell für automatisiertes Fahren verwendet. Dabei wurden die Parameter entsprechend verändert, um kürzere Sicherheitsabstände und geringere Stochastik zu berücksichtigen. Da dieses Modell ursprünglich für Autobahnverkehr entwickelt wurde, wurden zuerst auch AF auf Autobahnen damit modelliert (Hartmann et al., 2017; Krause et al., 2017; Motamedidehkordi, Margreiter, Hoffmann, & Busch, 2016; Zeidler, Buck, Kautzsch, Vortisch, & Weyland, 2018). Das Modell findet aber auch in der Modellierung von AF im urbanen Raum Anwendung (Olstam et al., 2020).

Die Parameter des Fahrzeugfolgmodells von Krauß wurden in (Lu, Tettamanti, Hörcher, & Varga, 2020) angepasst, um AF zu modellieren. Die Autoren passen jene Parameter an, welche sich auf das longitudinale Fahrverhalten, die Beschleunigung, das Bremsverhalten, sowie die Zeitlückenakzeptanz beziehen. Die Studie untersucht die Effekte AVF für einen Stadtteil Budapests und stellt somit eine Anwendung der Modellierung von AVF im urbanen Raum dar.

### 3.3.2.3. Fahrstreifenwechselmodelle und AVF

Zu Fahrstreifenwechselmodellen existieren vergleichsweise wenige Forschungsergebnisse (Do et al., 2019). Nichtsdestotrotz sollten diese untersucht werden, da die Querführung ein wichtiger Bestandteil der Fahrfunktionen ist (siehe Abschnitt 3.3.1.2). In einer experimentellen Simulationsstudie zeigen (Ioannou & Stefanovic, 2005), dass ACC Fahrzeuge die Störungen durch einschneidende Fahrstreifenwechselmanöver auf Autobahnen in einer für das Gesamtsystem vorteilhaften Art und Weise abdämpfen (verglichen zu einer ähnlichen Situation ohne ACC Fahrzeuge). (H. Liu, Kan, Shladover, Lu, & Ferlis, 2018b) erweitern ein existierendes CACC-Modell, um den Mischverkehr von konventionellen und CACC-Fahrzeugen zu modellieren. Diese Erweiterung beinhaltet auch ein Fahrstreifenwechselmodell. (Olstam et al., 2020) ändern in ihrer Studie die Parameter des Fahrstreifenwechselmodells in VISSIM basierend auf konzeptionellen Überlegungen, da keine Daten zur Kalibrierung vorhanden sind. Konkret werden beispielsweise die für einen Fahrstreifenwechsel benötigten Zeitlücken verringert, um den Umstand zu berücksichtigen, dass AVF präzisere Fahrmanöver ausführen können sowie geringere Reaktionszeiten besitzen werden.

### 3.3.2.4. Vernetzungs- und Kooperationsmodellierung

Die Kooperation zwischen Fahrzeugen bedingt Kommunikation, welche sich wie oben beschrieben in V2V- und V2I-Kommunikation unterteilen lässt. Dieser Aspekt ist besonders wichtig, da vermutet wird, dass Kooperation erhebliche Einflüsse auf den Verkehrsfluss hat (Do et al., 2019).

Bei Kommunikation ohne Kooperation führt die geteilte Information zwischen Fahrzeugen lediglich zu einer erweiterten Informationslage für alle kommunizierenden Fahrzeuge. Diese Kommunikation kann dadurch modelliert werden, dass Fahrzeuge in ihren Entscheidungen Informationen über benachbarte Fahrzeuge berücksichtigen.

(Olstam et al., 2020) kalibrieren die Wiedemann 99-Modelle auf Basis von Daten aus dem Forschungsprojekt CoExist. Sie zeigen, dass der nötige Sicherheitsabstand auch im Modell bei fehlender V2V-Kommunikation substantiell größer ist als bei existierender V2V-Kommunikation. Weitere Informationsvorteile lassen sich in der Verkehrsflusssimulation beispielsweise durch eine optimierte Routenwahl abbilden, da eine verbesserte Informationslage zu verbesserten Entscheidungen führen kann (Atkins, 2016). Auch in (Krause et al., 2017) wurden neben der Adaptierung der Parameter des Fahrzeugfolge-modells für die Modellierung von AF unter anderem Aspekte wie Kommunikation und Kooperation betrachtet. Dies wurde ebenso mit einer Anpassung der Verhaltensparameter berücksichtigt. Weiterhin bestehen Modellierungsansätze zur Abbildung von Kooperation. In den Modellen zum CACC kann Kooperation explizit modelliert werden. Dies entspricht einem dezentralen Ansatz.

Des Weiteren existieren zentrale Ansätze, um zum Beispiel die Kapazität an Kreuzungen zu maximieren (z.B. (Yang, Guler, & Menendez, 2016)). Hierbei lassen sich die Studien unterteilen in jene, die das Potential AVF für eine verbesserte Verkehrssteuerung (Guo, Li, & (Jeff) Ban, 2019) bei Durchdringungsgraden kleiner als 100 % untersuchen, und jene, die bei vollständigem Durchdringungsgrad Algorithmen zum sogenannten autonomen Kreuzungsmanagement (engl. *Autonomous Intersection Management, AIM*) (Zhong, Nejad, & Lee, 2020) entwickeln. Diese zwei Kategorien sind in den Abschnitten 3.4.3.1 und 3.4.3.2 beschrieben, da sie direkt zu den entsprechenden Wirkungen von AVF auf urbane Verkehrsflüsse in Bezug gesetzt werden können. Im Projekt FLOW (Wu, Jang, Vinitzky, & Bayen, 2018; Wu, Kreidieh, Parvate, Vinitzky, & Bayen, 2017) der Universität Berkeley haben mehrere Wissenschaftler eine Plattform basierend auf der mikroskopischen Simulationsumgebung SUMO und Methoden des maschinellen Lernens aufgebaut, um Kooperation zwischen automatisierten Fahrzeugen zu modellieren. Diese

Plattform ermöglicht es, einzelne AF so zu steuern, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit maximal wird. De facto wird dadurch ein zentral gesteuertes kooperatives Fahren im urbanen Raum modelliert, welches indirekt auch nicht vernetzte Fahrzeuge beeinflusst. Die modellierten Netzwerke umfassen sowohl Autobahnen (Kreidieh, Wu, & Bayen, 2018), als auch städtische Szenarien, in denen beispielsweise signalisierte Knotenpunkte vorkommen (Vinitsky et al., 2018). Der Fokus lag hierbei auf der theoretischen Untersuchung eines solchen Steuerungssystems. Zudem wurde implizit ein Systemoptimum in Abgrenzung zum Nutzergleichgewicht angestrebt. Diese Implikation müsste in vertiefter Forschung kritisch hinterfragt werden.

Insgesamt bietet die Simulation eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Anpassung entsprechender Parameter. So verwenden (Atkins, 2016) zur Repräsentation einer höheren Informationsdichte beispielsweise eine erweiterte Sichtweite von Fahrzeugen sowie einen reduzierten Abstand zwischen AVF.

Das Pilotprojekt zu V2X-Kommunikation in Deutschland war simTD (simTD, 2013), in welchem kommunizierende Fahrzeuge in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation nachgebildet wurden. Die Ergebnisse zeigen die positiven Effekte der untersuchten Aspekte des kooperativen Fahrens auf den Verkehrsfluss (Schimandl, Baur, Hoffmann, Gabloner, & Margreiter, 2013). Das bis Mitte 2023 laufende Forschungsvorhaben TEMPUS (TEMPUS Consortium, n.d.) untersucht Auswirkungen von automatisiertem und vernetztem Fahren in einem großen Reallabor im Münchner Raum.

### 3.3.2.5. Automatisierungsstufen

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Modellierung der FAS bzw. des Automatisierungsgrads. (Olstam et al., 2020) schreiben, dass es aus der Perspektive der Verkehrsmodellierung wichtiger ist, die wichtigsten Verhaltensgrundsätze modellieren zu können, anstatt detaillierte Beschreibungen der einzelnen Funktionalitäten und FAS wiedergeben zu können. Dieser Aussage folgend fokussieren sich viele Studien auf Automatisierungsstufen anstatt auf einzelne FAS (Atkins, 2016; Calvert et al., 2017; Do et al., 2019; Olstam et al., 2020).

(Do et al., 2019) fassen in ihrem Übersichtspapier die verschiedensten Modellierungsansätze zusammen, und stellen fest, dass meist Fahrzeuge mit ACC- und CACC-Technologie, sowie AF und AVF untersucht werden. Meist wird jedoch lediglich eine Ausprägung des AVF ausgewählt, und diese dann in verschiedenen Durchdringungsgraden im Verkehrsfluss untersucht (Do et al., 2019; Olstam et al., 2020). (Calvert et al., 2017) hält

fest, dass es sehr wahrscheinlich ist, dass Fahrzeuge mit verschiedenen Automatisierungsstufen zugleich existieren werden. Dennoch variieren sie in ihrer Analyse lediglich einzelne Fahrfunktionen separat (Olstam et al., 2020). Ähnlich geschieht dies in der Studie von (Atkins, 2016). Die einzelnen Fahrfunktionen werden zwar in ihrer Ausprägung variiert, aber nicht kombiniert. Zum Beispiel werden verschiedene Sicherheitsabstände berücksichtigt.

(Olstam et al., 2020) schreiben, dass es wichtig ist, mögliche Interaktionen abzubilden und daher möglichst viele aktive, dem AVF zugesprochene FAS zu berücksichtigen. Daher unterteilen die Autoren die Automatisierungsstufen in eine technikorienteerte Fahrzeugklasse und eine fahrverhaltensorienteerte Fahrlogik. Die Automatisierungsstufen umfassen „grundlegende“, „mittlere“ und „fortgeschrittene“ Automatisierung. Die Autoren nehmen an, dass das Hauptaugenmerk auf der Sicherheit der Fahrzeuge liegt. Der Unterschied in den Klassen liegt darin, wie konservativ sich die Fahrzeuge in den jeweiligen Situationen verhalten.

- *Grundlegende Automatisierung*: SAE-Stufe 4 für richtungsgetrennte Fahrbahnen kann erreicht werden. Es muss eine physische Trennung zu schwachen Verkehrsteilnehmern vorhanden sein. Das generelle Verhalten ist sehr vorsichtig und risikoavers.
- *Mittlere Automatisierung*: SAE-Stufe 4 für nicht richtungsgetrennte Fahrbahnen. Diese Fahrzeugklasse verhält sich generell etwas weniger risikoscheu.
- *Fortgeschrittene Automatisierung*: SAE-Stufe 4 in den meisten Infrastrukturausprägungen. In komplexen Situationen wird sich auch diese Fahrzeugklasse noch vorsichtig verhalten.

Zudem werden vier verschiedene Fahrlogiken eingeführt. Eine Fahrlogik beschreibt das Verhalten eines Fahrzeugs mit einer bestimmten Automatisierungsstufe für eine gewisse Infrastrukturmgebung. Somit kann berücksichtigt werden, dass zum Beispiel auf Autobahnen AVF früher im Einsatz sein werden als im städtischen Bereich. Die vorgeschlagenen Logiken sind:

- *Rail-safe*: Diese Fahrlogik bedingt, dass das Fahrzeug einer vordefinierten Trajektorie folgt und eine Notbremsung durchführt, sollte eine Kollision drohen. Falls die Sensoren nicht die vollständige Einsicht haben sollten, verringert das Fahrzeug die Geschwindigkeit, um das Kollisionsrisiko zu reduzieren. Es findet keine Kommunikation oder Kooperation zwischen Fahrzeugen statt.

- *Cautious*: Das Fahrzeug berechnet Zeitlücken genau und nutzt diese nur, wenn sie akzeptabel groß sind. Falls die Sensoren nicht die vollständige Einsicht haben sollten, verringert das Fahrzeug auch in dieser Fahrlogik die Geschwindigkeit, um das Kollisionsrisiko zu reduzieren. Es findet keine Kommunikation oder Kooperation zwischen Fahrzeugen statt.
- *Normal*: Fahrzeuge, welche dieser Logik folgen, verhalten sich in etwa wie menschliche Fahrer, nur, dass die Umgebung und das Umfeld durch Sensoren wahrgenommen werden. Wenig Kommunikation oder Kooperation zwischen Fahrzeugen findet statt.
- *All-knowing*: Dies entspricht dem voll automatisierten und kooperativen Fahren, bei welchem jedes Fahrzeug die vorhandenen Informationen zu Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung teilt. Dadurch werden die Umgebung und das Umfeld perfekt wahrgenommen und vorhergesagt. Vollständige Kommunikation oder Kooperation zwischen Fahrzeugen findet statt.

Diese Aufteilung nach (Olstam et al., 2020) ermöglicht es, die Fahrlogik abhängig vom Straßentyp und der Automatisierungsstufe festzulegen, siehe Tabelle 1.

<b>Straßentyp</b>	<b>Grundlegende Automatisierung</b>	<b>Mittlere Automatisierung</b>	<b>Fortgeschrittene Automatisierung</b>
Autobahn	<i>Cautious</i>	<i>Normal</i>	<i>All-knowing</i>
Hauptverkehrsstraße	<i>Cautious</i>	<i>Cautious/Normal</i>	<i>All-knowing</i>
Stadtstraße	<i>Manual</i>	<i>Cautious</i>	<i>Normal</i>
Geteiltes Areal (eng. Shared Space)	<i>Manual</i>	<i>Rail-safe/Manual</i>	<i>Cautious</i>

Tabelle 1: Spezifizierung der Fahrlogiken für verschiedene Straßentypen und Fahrzeugklassen nach (Olstam et al., 2020).

### 3.3.2.6. Kalibrierung und Validierung

Die Kalibrierung dient dem Abgleich eines Modells mit der Realität. In Bezug auf Verkehrsflussmodelle bedeutet dies, dass die spezifischen Modellparameter in einer Art und Weise angepasst werden, dass gewisse Kenngrößen (z.B.: durchschnittliche Reisezeiten im modellierten Netzabschnitt) einen geringen Fehler zu entsprechenden empirischen Daten aufweisen. In der Validierung wird dieses kalibrierte Modell dann mit einem

zweiten empirischen Datensatz verglichen, ohne dass die Parameter erneut angepasst werden. Ist der Fehlerwert ausreichend gering, gilt das Modell als validiert.

Eine Herausforderung der Modellierung und Simulation von AVF ist es, dass bisher empirische Daten nur aus einigen wenigen, experimentellen Feldversuchen existieren. Diese wurden in den Studien von (Milanés & Shladover, 2014; Olstam et al., 2020; Zeidler et al., 2018) ausgenutzt, um die jeweiligen Modelle zu kalibrieren und validieren. Dennoch ist die Kalibrierung nur für die jeweiligen Situationen gültig und lässt sich nur schwer verallgemeinern. Sobald die Technologie stärker verbreitet ist und entsprechend umfangreiche empirische Daten verfügbar sind, können auch die derzeit noch bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich der Modellierung und Simulation und folglich der Simulationsergebnisse besser eingegrenzt und reduziert werden. Für dieses Forschungsprojekt wird auf publizierte kalibrierte Modelle zurückgegriffen (Olstam et al., 2020), die in einem europäischen, also dem deutschen ähnlichen Kontext angepasst wurden, und daher auch für dieses FE-Projekt anwendbar sind.

### **3.3.3. Zusammenfassung**

Die Literaturrecherche zu den Eigenschaften von AVF zeigt die wichtigsten Aspekte für deren Modellierung in Verkehrsflussmodellen auf. Dies sind die Automatisierungsstufen, das longitudinale und laterale Fahrverhalten, die Wahrnehmung und Aktorik, zu berücksichtigende Rahmenbedingungen aus der Verkehrsordnung, sowie die Vernetzung und Kooperation der Fahrzeuge. Es ist zu beachten, dass auch die Ausprägung dieser Eigenschaften teils nur auf theoretischen Studien beruhen, da die Technologie noch nicht vollkommen ausgereift ist.

Basierend auf den Eigenschaften von AVF wurden Anforderungen an die Modellierung gestellt. Die fahrzeugspezifische Natur der Eigenschaften legt nahe, dass mikroskopische Verkehrsflussmodelle am geeignetsten sind, um die verschiedensten Aspekte berücksichtigen zu können. Dies deckt sich mit der Tatsache, dass der Großteil bereits existierender Studien ebendiesen Ansatz verfolgt. Unter anderem kann dadurch auf die den meso- und makroskopischen Verkehrsmodellen inhärenten Annahmen verzichtet werden. Beispiele klassischer Annahmen sind, dass das Verhalten aller Fahrzeuge gleich ist und dass Geschwindigkeiten beliebig schnell geändert werden können. Zudem können durch die Wahl eines mikroskopischen Modellansatzes die wenigen existierenden Daten zu AVF und die darauf kalibrierten Fahrverhaltensmodelle genutzt werden.

Auf Basis dieser Recherche scheint die Studie von (Olstam et al., 2020) sehr vielversprechend zu sein, da die existierenden Unsicherheiten bzgl. AVF explizit berücksichtigt werden. Zum einen wird ein Fokus daraufgelegt, wie verschiedene Fahrzeugklassen und Fahrlogiken in der Modellierung angewandt werden können. Zudem stellen die Autoren ein auf Basis von Realdaten kalibriertes Fahrzeugfolgemodell vor. Zudem lassen sich die Aspekte der Kommunikation berücksichtigen. Eine Anwendung der im FLOW-Projekt entwickelten Methoden würde schließlich zu einer geeigneten Modellierung der Kooperation führen. Dennoch muss betont werden, dass die Modellierung nach wie vor weitgehend auf Annahmen basiert und die Resultate daher mit entsprechender Vorsicht zu behandeln sind.

### 3.4. Wirkungen automatisierter und vernetzter Fahrzeuge auf Verkehrssysteme

Es existiert eine Vielzahl an Studien, die sich mit den möglichen Auswirkungen des AVF auf Verkehrssysteme inklusive dem Verkehrsablauf und entsprechenden Verkehrskenngrößen, aber auch auf angrenzende Systeme, beschäftigen. Da nicht alle Aspekte für die hier zu untersuchende Fragestellung relevant sind, wird in Abschnitt 3.4.1 nur ein genereller Überblick geboten, um dann in den folgenden Abschnitten auf den Verkehrsfluss außerorts (3.4.2) und innerorts (3.4.3) einzugehen. Auf Basis des Verkehrsflusses können Verkehrskenngrößen wie das Fundamentaldiagramm, welches den Zusammenhang von Verkehrsfluss und Verkehrsdichte beschreibt, Kapazitätskennwerte und Sättigungsverkehrsstärken abgeleitet werden. Im letzten Abschnitt wird die Recherche zusammengefasst.

#### 3.4.1. Allgemeine Wirkungen

In ihrem Leitartikel zu allgemeinen Wirkungen des AVF fassen (Milakis, 2019) mögliche Auswirkungen zusammen. Sie schreiben, dass AVF mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zu einer erhöhten Gesamtanzahl an gefahrenen Kilometern aller Reisenden, verringerter Nutzung von Angeboten des öffentlichen Verkehrs, relativ weniger Fußgängern und Radfahrern, weniger Nachfrage nach Parkplätzen, und einer erhöhten Verstädterung und Ausdehnung der Vororte führen wird. Das AVF wird somit längerfristige Entwicklungen wie die Landnutzung und die Infrastruktur, aber auch dynamische verkehrliche Aspekte, wie die Kapazität und Staugeschehen beeinflussen. Dieser Einfluss wird sowohl auf der Verkehrsangebots- als auch auf der Verkehrsnachfrageseite bestehen. Es kann also durchaus von disruptiven Veränderungen gesprochen werden.

Die Autoren halten zudem fest, dass die bisherige Forschung sehr technologiefokussiert war und erst seit 2015 über den Tellerrand blickt und begonnen hat, den Einfluss von AVF auf andere Aspekte, welche durch Verkehr beeinflusst werden, zu betrachten. Ein weiteres Grundlagendokument (Milakis, Van Arem, & Van Wee, 2017) untersucht die existierende Forschung zu den Implikationen des AVF auf Richtlinien und die Gesellschaft an sich. Die Autoren erstellen ein Modell, um die Implikationen zu beschreiben. Dabei werden folgende Implikationen erster Ordnung betrachtet:

- Kosten einer Reise: Es werden die Einflüsse auf die fixen Kosten (um ein AVF zu kaufen), aber auch die generalisierten Kosten einer Reise, welche Reisezeit und Komfort umfassen, sowie Einflüsse auf die sog. *Value of Time* untersucht.
- Straßenkapazität: Es werden speziell Studien zur Kapazität von Autobahnen, sowie die Kapazität von Kreuzungen untersucht.
- Reiseentscheidungen: Hier werden Studien zum Einfluss von AVF auf die Fahrzeugnutzung und die Verkehrsmittelwahl analysiert.

Als Implikationen zweiter Ordnung führen die Autoren die Folgenden auf:

- Fahrzeugbesitz und Car-Sharing,
- Standortwahl und Landnutzung,
- Verkehrsinfrastruktur,
- Energieverbrauch und Luftverschmutzung.

Schließlich werden die Implikationen dritter Ordnung, welche übergeordnete gesellschaftliche Aspekte betreffen, genannt:

- Sicherheit,
- Soziale Gerechtigkeit,
- Wirtschaft,
- Gesundheitswesen.

Graphisch stellen die Autoren dieses Modell als *ripple effect* (engl. für Welleneffekt) dar, siehe Abbildung 3. Dabei werden die gegenseitigen Einflüsse der einzelnen Implikationen veranschaulicht. Der Gegenstand dieses Forschungsprojekts betrifft den Aspekt der Straßenkapazität, welcher einen Einfluss auf das Staugeschehen und somit auf die Reisezeiten hat. Es ist daher von zentraler Bedeutung, die Auswirkungen des AVF auf die Kapazität urbaner Verkehrsinfrastruktur und davon beeinflusste verkehrliche Kennwerte zu beleuchten.

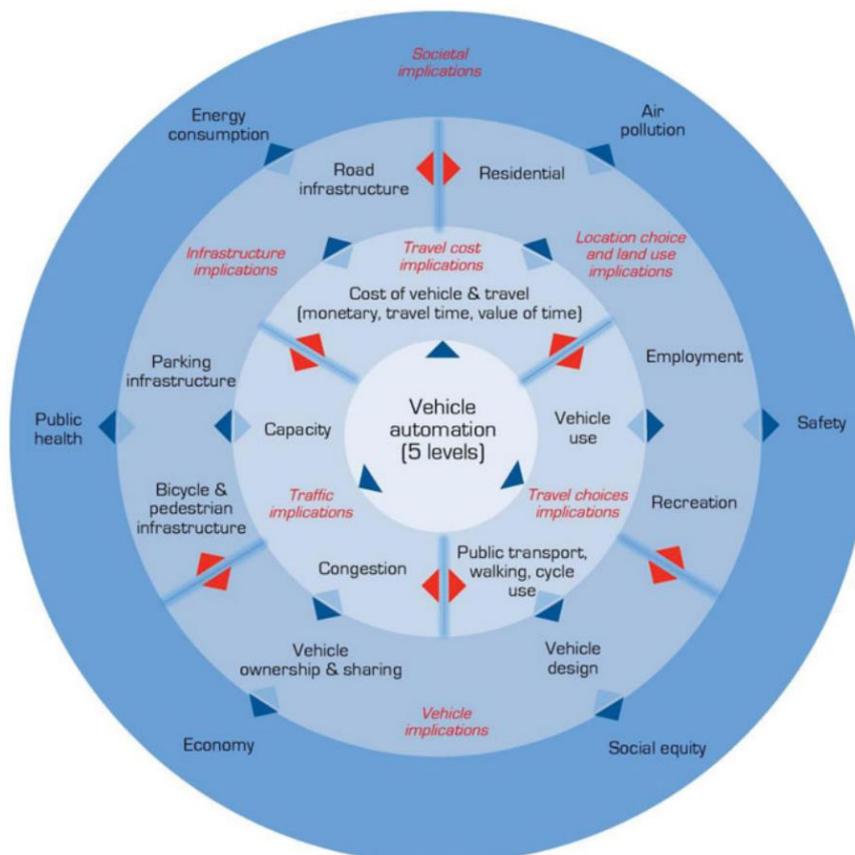


Abbildung 3: Der *ripple effect* des AVF nach (Milakis et al., 2017).

(Milakis et al., 2017) halten fest, dass sich die meisten Studien mit der Kapazität von Autobahnen beschäftigen und nur sehr wenige mit jener von Knotenpunkten. Die generelle Erwartung ist eine Steigerung der Kapazität für alle Durchdringungsgrade des automatisierten Fahrens, wobei auch widersprüchliche Resultate bestehen. Solche Widersprüche entspringen auch den Umständen, dass teils noch keine einheitliche Terminologie verwendet wird, d.h. unter „automatisiertem Fahrzeug“ unterschiedliche FAS verstanden werden und dass die Ergebnisse primär Simulationsstudien entspringen, welche nur in den seltensten Fällen kalibriert wurden (Do et al., 2019).

Weitere wichtige Entwicklungen betreffen die Verkehrssicherheit, den Energieverbrauch und die Luftverschmutzung. So wird erwartet, dass sich die Verkehrssicherheit durch die Einführung von AVF erhöhen wird (Gerstenberger, 2015; Kühn, 2019; Milakis et al., 2017). Zudem gehen (Olstam et al., 2020) davon aus, dass die Fahrzeughersteller die Haftung für Unfälle übernehmen werden und somit eine Minimierung des Unfallrisikos höchste Priorität haben wird. Die Autoren folgern diese Annahme aus der Vermutung, dass automatisierte Fahrzeuge wenig Attraktivität besäßen, wenn das gesamte Risiko beim Käufer läge, da diese keinen Einfluss auf die eingebauten Algorithmen und das Fahrverhalten ausüben können. Des Weiteren wird erwartet, dass die Sensorik und die

damit verbundene verbesserte Wahrnehmung sowie die präzise Regelung der Fahrzeuge dazu führt, dass Unfälle, die aus menschlichen Fehlern entstehen, vermieden werden können (Hoogendoorn, Varotto, Bogenberger, Hagenzieker, & van Arem, 2015; Vollrath, Briest, & Schießl, 2006).

Der Energieverbrauch pro Fahrzeug könnte aufgrund der effizienteren Fahrweise sinken. Eine erhöhte Menge an Fahrten sowie Fahrzeugen könnte diese positive Entwicklung jedoch konterkarieren und somit zu einer Erhöhung des gesamten Energieverbrauchs führen (Milakis et al., 2017). Gleiches gilt für die Luftverschmutzung (Milakis et al., 2017).

### **3.4.2. Verkehrsfluss: Außerorts**

Wie in (Milakis et al., 2017) beschrieben, untersucht ein Großteil der existierenden Studien den Einfluss von AVF auf den Verkehrsfluss auf Autobahnabschnitten. Meistens wird dabei das Fundamentaldiagramm bzw. die Kapazität selbst als Verkehrskenngröße untersucht.

In der Übersichtsstudie von (Do et al., 2019) zu den Auswirkungen von AVF auf Autobahnabschnitten werden insgesamt 23 Studien untersucht. Mehr als die Hälfte derer bezieht sich dabei auf die Kapazität als primäres Analyseziel. Die Autoren klassifizieren die Fahrzeuge in ACC, CACC, AF und AVF. Dabei nehmen sie an, dass CACC nur die Kooperation in longitudinaler Richtung beinhaltet.

Des Weiteren halten die Autoren fest, dass der Verkehrsfluss mit einem höheren Durchdringungsgrad von ACC-Fahrzeugen generell steigen wird (Kesting, Treiber, & Helbing, 2010; Kesting, Treiber, Schönhof, & Helbing, 2008; H. Liu et al., 2018b; H. Liu, Kan, Shladover, Lu, & Ferlis, 2018a; Y. Liu, Guo, Taplin, & Wang, 2017; Olia, Razavi, Abdulhai, & Abdelgawad, 2018; Shladover, Su, & Lu, 2012; Talebpour & Mahmassani, 2016; VanderWerf, Shladover, Kourjanskaia, Miller, & Krishnan, 2001). Die Hoffnung ist, dass die adaptive Fahrweise Stoßwellen abdämpft, welche durch Störungen im Verkehrsfluss (z.B. Fahrstreifenwechsel) entstehen, und somit schlussendlich zu einer höheren Kolonnenstabilität führen (Kesting et al., 2010; Motamedidehkordi, Margreiter, Hoffmann, et al., 2016; Talebpour, Mahmassani, & Hamdar, 2018). Einige Wissenschaftler (Kesting et al., 2008; Kesting, Treiber, Schönhof, & Helbing, 2007) gehen davon aus, dass bereits geringe Durchdringungsgrade positive Effekte auf den Verkehrsfluss haben, während andere Studien vermuten (Shladover et al., 2012; VanderWerf et al., 2001),

dass ACC-Fahrzeuge generell einen eher geringen Effekt auf die Kapazität von Autobahnen haben werden, und dass das volle Potential nur mit Kooperation zwischen den Fahrzeugen, also mit CACC-Technologie, ausgeschöpft werden kann.

Der positive Effekt der Kooperation zeigt sich auch in Studien zu AVF-Fahrzeugen, welche mit steigendem Durchdringungsgrad substantiell höhere Kapazitäten herbeiführen (H. Liu et al., 2018b; Ollia et al., 2018). Auf Basis der V2V-Kommunikation können Stoßwellen noch effizienter abgedämpft werden, als dies bei ACC-Fahrzeugen der Fall ist (Milanés & Shladover, 2014). Auch (Xiao et al., 2017) heben den Vorteil des CACC für den Verkehrsfluss hervor. Die Kolonnenstabilität ist in den durchgeführten Untersuchungen von ACC-Fahrzeugen nicht gegeben, Störungen im Verkehrsfluss können teils nicht ausgeglichen werden. Der Einsatz von CACC löst diese Probleme und Stoßwellen im Verkehrsfluss können erfolgreich gedämpft werden. Ähnliche Ergebnisse werden von Analysen der Daten aus dem simTD-Projekt (simTD, 2013) berichtet. Es wird auf Basis von Simulationsstudien mit kalibrierten Fahrzeugfolgemodellen für konventionelle Fahrzeuge gezeigt, dass die V2V-Kommunikation dazu führen kann, dass sich Stau weniger schnell ausbreitet, d.h. die Stoßwellen erfolgreich gedämpft werden und die Kapazität des betrachteten Abschnitts erhöht wird (Motamedidehkordi, Benz, & Margreiter, 2016; Motamedidehkordi, Margreiter, & Benz, 2016a). Die positiven Effekte scheinen für geringere Durchdringungsgrade jedoch niedrig zu sein (Motamedidehkordi, Margreiter, & Benz, 2016b). Dies deckt sich mit Ergebnissen von (Shladover et al., 2012).

Neben normalen Autobahnabschnitten, sind aber auch jene Abschnitte von großer Bedeutung, in denen Ein- und Ausfahrten sowie Verflechtungszonen vorkommen. Aufgrund des dort gehäuft auftretens von Fahrstreifenwechseln stellen diese oft Engpässe im Fernstraßennetz dar. In einer theoretischen Untersuchung basierend auf einem hybriden Verkehrsflussmodell zeigen (Tilg, Yang, & Menendez, 2018) die potenziellen Kapazitätserhöhungen in Verflechtungszonen auf. Die Autoren berücksichtigen neben den verringerten Reaktionszeiten der AF, dass der Ort des Fahrstreifenwechsels gesteuert werden kann. Es wird jedoch nur eine automatisierte Fahrzeugklasse berücksichtigt. Der Einsatz von CACC im Bereich von Autobahneinfahrten wird beispielsweise in (H. Liu et al., 2018a; Xiao et al., 2018) untersucht. Die Simulationsstudie von (H. Liu et al., 2018a) kommt zum Schluss, dass die CACC-Technologie auch bei Autobahnabschnitten mit Einfahrten eine Steigerung der Kapazitäten mit sich bringen kann. Jedoch könnte eine zentral geregelte Steuerung von Vorteil sein, um ähnlich hohe Kapazitäten wie auf regulären Autobahnabschnitten zu erreichen. (Xiao et al., 2018) berücksichtigen zudem, dass

der Fahrer in gewissen Situationen die Kontrolle übernehmen muss. Die Resultate zeigen zwar immer noch einen positiven Effekt der CACC-Technologie auf den Verkehrsfluss, aber jener ist substantiell geringer als bei regulären Autobahnabschnitten.

In (Krause et al., 2017) wurden die Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur Deutschlands auf Basis von Simulationen untersucht. Dabei wurden verschiedenste Infrastrukturelemente inklusive Autobahnabschnitten mit Ein- und Ausfahrten berücksichtigt. Es zeigt sich, dass die Kapazitätsveränderungen stark von den Annahmen zum Fahrverhalten von AVF abhängen. Konservatives Fahrverhalten kann sogar zu Kapazitätsminderungen von bestimmten Streckenelementen führen. Durch die Berücksichtigung verschiedener Streckenelemente und eine Hochrechnung der Effekte auf das Fernstraßennetz Deutschlands verfolgt diese Studie einen Ansatz, der die Effekte von AVF auf die Kapazität eines gesamten Netzes und nicht nur auf einzelne Elemente untersucht. Diese Erkenntnisse sind jedoch nicht ohne Weiteres auf urbane Gebiete übertragbar. Deshalb werden Studien zum städtischen Bereich im nächsten Abschnitt untersucht.

### **3.4.3. Verkehrsfluss: Innerorts**

Im Gegensatz zur großen Anzahl an Studien zu den Auswirkungen von AVF auf den Verkehrsfluss auf Autobahnen existiert nur eine geringere Anzahl an Veröffentlichungen, welche explizit die Auswirkungen der Automatisierung auf Verkehrsflüsse im urbanen Raum betrachtet (Milakis et al., 2017). Das kann unter anderem daran liegen, dass es im urbanen Raum zu Interaktionen der Fahrzeuge mit anderen Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern und Radfahrern, mit dem öffentlichen Verkehr sowie mit Parkplatz suchenden Fahrzeugen, kommt. Diese sind schwieriger zu modellieren, und die Einflüsse auf den Verkehrsablauf bei Einführung von AVF ist noch größtenteils offen. Zusätzlich werden die Kapazitäten von urbanen Verkehrsanlagen primär durch Verkehrssteuerung an Knotenpunkten und weniger durch Dynamiken im Verkehrsablauf bestimmt (Friedrich, 2015). Es wird vermutet, dass AVF großes Potential für die Verbesserung der urbanen Verkehrssteuerung birgt (Mahmassani, 2016). Entsprechend existiert viel Literatur zur Thematik der urbanen Verkehrssteuerung und der möglichen Einbindung von AVF. Die meisten Studien fokussierten sich in der Vergangenheit daher auf die Auswirkungen des AVF, im speziellen der V2X-Kommunikation auf die urbane Verkehrssteuerung. Die untersuchten Verkehrskenngrößen sind dabei meistens Wartezeiten, Anzahl der Halte sowie Kapazitäten.

Die Potentiale für die Verkehrssteuerung durch das AVF werden im Übersichtspapier von (Zhong et al., 2020) in zwei Kategorien unterteilt:

- Verbesserte Signalphasenplanung auf Basis der hochaufgelösten Echtzeitdaten, welche Dank der V2I-Kommunikation erhoben werden können. (Die Planung kann auch bereits für Mischverkehre von AVF und konventionellen Fahrzeuge verbessert werden.)
- Entwicklung einer lichtsignalfreien Kreuzung durch selbstorganisierte Steuerung der AVF. Entsprechende Verkehrssteuerungen werden unter dem Namen *Autonomous Intersection Management* zusammengefasst, und benötigen einen 100-prozentigen Durchdringungsgrad von AVF.

### 3.4.3.1. Verbesserte Signalphasenplanung

Abhängig vom Durchdringungsgrad von AVF im gesamten Verkehrsfluss können gravierende Verbesserungen der Signalphasenplanung möglich werden. Dies hat wiederum einen entscheidenden Einfluss auf die Kapazität und Leistungsfähigkeit städtischer Straßennetze.

Im erst kürzlich erschienenen Übersichtspapier von (Guo et al., 2019) wurden die Potentiale von AVF für die Planung und den Betrieb von Lichtsignalanlagen beleuchtet und untersucht. Dabei wurde die Analyse von Szenarien mit ausschließlich AVF bewusst vermieden. (Guo et al., 2019) halten fest, dass die Daten aus der V2X-Kommunikation eine verbesserte Verkehrszustandsschätzung erlauben. Die Autoren beschreiben drei wichtige Potentiale. Zum einen kann dadurch die Leistungsfähigkeit verschiedener Signalpläne genauer evaluiert werden und somit die Planung verbessert werden. Die Abschätzung der Verkehrszustände und anderer wichtiger Verkehrskenngrößen, wie etwa die Warteschlangenlänge, kann bereits mit geringen Durchdringungsgraden merklich verbessert werden (Papapanagiotou & Busch, 2020). Zudem ist der Verkehrszustand eine wichtige Eingangsgröße für Verkehrssteuerungsalgorithmen. Eine Verbesserung der Zustandsschätzung kann somit zu einer verbesserten Funktionsweise dieser Algorithmen führen (H. J. Kath, 2017; J. Kath, Papapanagiotou, & Busch, 2015). Des Weiteren kann AVF dank V2I-Kommunikation die Fahrweise der Fahrzeuge mit Schaltzeiten der Lichtsignale abgleichen, was letztlich zu einem effizienteren Verkehrsfluss führen kann.

Die potentiell verbesserte Verkehrssteuerung, wie in (Guo et al., 2019) beschrieben, ist für die vorliegende Simulationsstudie von besonderem Interesse, da Verkehrszustände per Definition bekannt sind. Die expliziten Potentiale für die Verkehrssteuerung werden von (Guo et al., 2019) für isolierte Kreuzungen in drei weitere Kategorien unterteilt:

- Fortgeschrittene Fahrerunterstützung (engl. *Advanced driver guidance*): Aufgrund des erweiterten Informationsaustauschs, können entweder Fahrer angeleitet werden oder AF direkt den Angaben folgen, um bestimmte Ziele, wie optimalen Verkehrsfluss, zu erreichen. Zum Beispiel wurde gezeigt, dass der Treibstoffverbrauch mittels sog. Eco-routing optimiert werden kann (Boriboonsomsin, Barth, Zhu, & Vu, 2012). Zudem konnte gezeigt werden, dass die Anzahl der Halte an Kreuzungen dank der Fahrerführung auf Basis der AVF-Daten um bis zu 80 % reduziert werden kann (Katsaros, Kernchen, Dianati, & Rieck, 2011). Diese Ergebnisse basieren jedoch auf Simulationen und nehmen eine vollständige Einhaltung der Systemvorschläge an.
- Optimierte Signalphasen: Die Leistungsfähigkeit der Kreuzungen kann auf Basis der Daten von AF erhöht werden (Wagner, 2016). Entsprechende Studien beziehen sich typischerweise auf adaptive Verkehrssteuerung, pulkbasierte Steuerung und planbasierte Steuerung. Die adaptive Verkehrssteuerung passt die Phasen entsprechend Verkehrszuständen an. Dabei wird keine Prognose ausgeführt. Dennoch hat eine erweiterte Datenlage dank AVF positive Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit entsprechender Verfahren (Day & Bullock, 2016; Goodall, Smith, & Park, 2013; Gradinescu, Gorgorin, Diaconescu, Cristea, & Iftode, 2007). Pulkbasierte Steuerungsalgorithmen wurden zwar schon früh entwickelt (Mirchandani & Head, 2001), wurden aber erst mit Berücksichtigung von V2X-Kommunikation realistisch (He, Head, & Ding, 2012; Liang, Guler, & Gayah, 2018; Lioris, Pedarsani, Tascikaraoglu, & Varaiya, 2017), da dann die entsprechenden Pulks erst richtig identifiziert werden können (Guo et al., 2019). Planbasierte Methoden schätzen die Ankunftsverteilungen und versuchen die Verkehrszustände vorherzusagen. (Feng, Head, Khoshmagham, & Zamanipour, 2015) zeigen, dass die Berücksichtigung von V2X-Daten vorteilhaft sein kann. Die entwickelte Methode führte zu 16 % weniger Wartezeiten in einer Simulationsstudie. Auch andere Studien zeigen die Potentiale von AVF für diese Art der Verkehrssteuerung auf (Diakaki, Papageorgiou, Dinopoulou, Papamichail, & Garyfalia, 2015; Islam & Hajbabaie, 2017).

- Mit Fahrzeug gekoppelte Lichtsignalsteuerung: Hierbei können die Fahrweise von AVF (insb. Geschwindigkeiten) und Lichtsignalpläne simultan optimiert werden, um die Leistungsfähigkeit der Kreuzungen zu erhöhen. Dies ist aufgrund des Echtzeitdatenaustauschs von Fahrzeugen und Infrastruktur möglich. Zahlreiche Studien belegen die Effektivität solcher Methoden (Ilgin Guler et al., 2014; Sun, Jin, & Ritchie, 2017; Yang et al., 2016).

### 3.4.3.2. Autonomous Intersection Management

Im traditionellen signalisierten Kreuzungsmanagement werden Daten zum vorherrschenden Verkehrszustand basierend auf Induktionsschleifen erhoben, damit die Signalphasen entsprechend bemessen werden können. Die menschlichen Fahrer werden per Lichtzeichen über die Überfahrerlaubnis informiert. Dieses System wird beim AIM vollständig durch V2X-Kommunikation ersetzt. Daten zum Verkehrszustand können direkt von den Fahrzeugen extrahiert werden und die Überfahrerlaubnis kann direkt kommuniziert werden. Im Vergleich zum signalisierten Kreuzungsmanagement werden die Kreuzungsüberfahrten beim AIM auf der Ebene des einzelnen Fahrzeugs geregelt. Zusätzlich wird beim AIM davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge automatisiert fahren, und keine menschliche Kontrolle notwendig ist. (Zhong et al., 2020). Da die Wirkungen der Steuerung stark von der jeweiligen Algorithmik abhängt, wird hier beides beschrieben. Die generelle Modellierung von Vernetzung und Kooperation befindet sich in Abschnitt 3.3.2.4.

(Zhong et al., 2020) unterteilen AIM in die Kategorien Streckenzugskoordination, Kreuzungsmanagement und Fahrzeugsteuerung. Das Kreuzungsmanagement besteht weiter aus den Aspekten der Prioritätszuweisung und des Reservierungssystems. Methoden der Prioritätszuweisung können in *First-come-first-served*, *systemoptimal* und *heuristisch* unterteilt werden. Erstere Kategorie ist von der Logik her intuitiv verständlich, kann aber an einzelnen Kreuzungen im Vergleich zu einer herkömmlichen Festzeitsteuerung zu geringeren Kapazitäten führen (Levin, Boyles, & Patel, 2016). Vielversprechender sind heuristische Methoden. In (Elhenawy, Elbery, Hassan, & Rakha, 2015) wird ein Spieltheorie-basierter Ansatz vorgeschlagen, der die durchschnittlichen Wartezeiten verglichen zu einer All-Way-Stopp-Steuerung bis zu knapp 90 % reduziert. Zudem bestehen Ansätze die auf die CACC-Technologie (Zohdy & Rakha, 2012) und Pulkbildung (Bashiri & Fleming, 2017) zurückgreifen. Das Reservierungssystem wird in Kreuzungs-basiert, *tile*-basiert, Konfliktpunkt-basiert und Fahrzeug-basiert kategorisiert (Zhong et al., 2020).

Diese Systeme stellen auf Basis unterschiedlicher Ansätze sicher, dass sich die Trajektorien der Fahrzeuge, welche die Kreuzung überqueren wollen, nicht schneiden. Der letzte wesentliche Aspekt des AIM ist die Organisationsstruktur der Fahrzeugsteuerung. Jene kann zentralisiert, dezentralisiert oder verteilt sein (Zhong et al., 2020). Erstere beschreibt ein System, bei dem jegliche Information und Entscheidungen von einem einzigen Punkt ausgehen, dem zentralen Steuerungselement. Dezentralisiertes AIM ist durch mehrere Steuerungselemente charakterisiert. Damit kann die Rechenlast aufgeteilt werden. Ein verteiltes AIM ist ein Extremfall des dezentralisierten, bei dem jedes Steuerungselement die Entscheidung für das eigene Handeln selbst trifft. Die Fahrzeuge selbst werden meist auf Basis der *Theorie der optimalen Steuerungen* (Tonon, Aronna, & Kalise, 2017) oder *modellprädiktiven Regelung* gesteuert (Du, HomChaudhuri, & Pisu, 2018).

(Zhong et al., 2020) evaluieren die bisherige Forschung zu AIM. Ähnlich zu den Studien zu den Auswirkungen des AVF auf den Verkehrsfluss außerorts, wurden bisher primär simulationsbasierte Studien durchgeführt. Sie kategorisieren die Studien in zwei Typen: Im Ersten liegt der Fokus auf optimaler Trajektorienplanung. Dabei wurden keine expliziten Modelle der Fahrzeugdynamik eingesetzt. Dafür werden aber Szenarien mit realistischen Verkehrsflüssen untersucht. Zum Beispiel analysiert (Bashiri & Fleming, 2017) ein kreuzungsbasiertes Reservierungssystem für AIM mit Verkehrsflüssen bis zu 2000 Fz/h. Im zweiten Typ von Studien liegt der Fokus hingegen auf der Fahrzeugdynamik und der Separierung der Konflikte. Dafür werden hier nur wenige Fahrzeuge in der Kreuzung selbst betrachtet. Die in den Studien entwickelten Algorithmen wurden meist (46 %) zu einfach Festzeitsteuerungen verglichen. Zusätzlich wurden die Vergleichssteuerungen meist nicht der Verkehrsnachfrage entsprechend bemessen, was in der Praxis aber bereits gang und gäbe ist. Auch adaptive Steuerungen wurden nicht zum Vergleich herangezogen. Ein weiteres knappes Viertel der Studien vergleicht zu einem Basisszenario mit First-come-first-served AIM.

Die verwendeten Leistungskennzahlen (*Measures of Effectiveness*) sind sehr häufig die durchschnittliche Verzögerung, Treibstoffverbrauch, durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Emissionen, Reisezeiten, etc. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung von (Zhong et al., 2020).

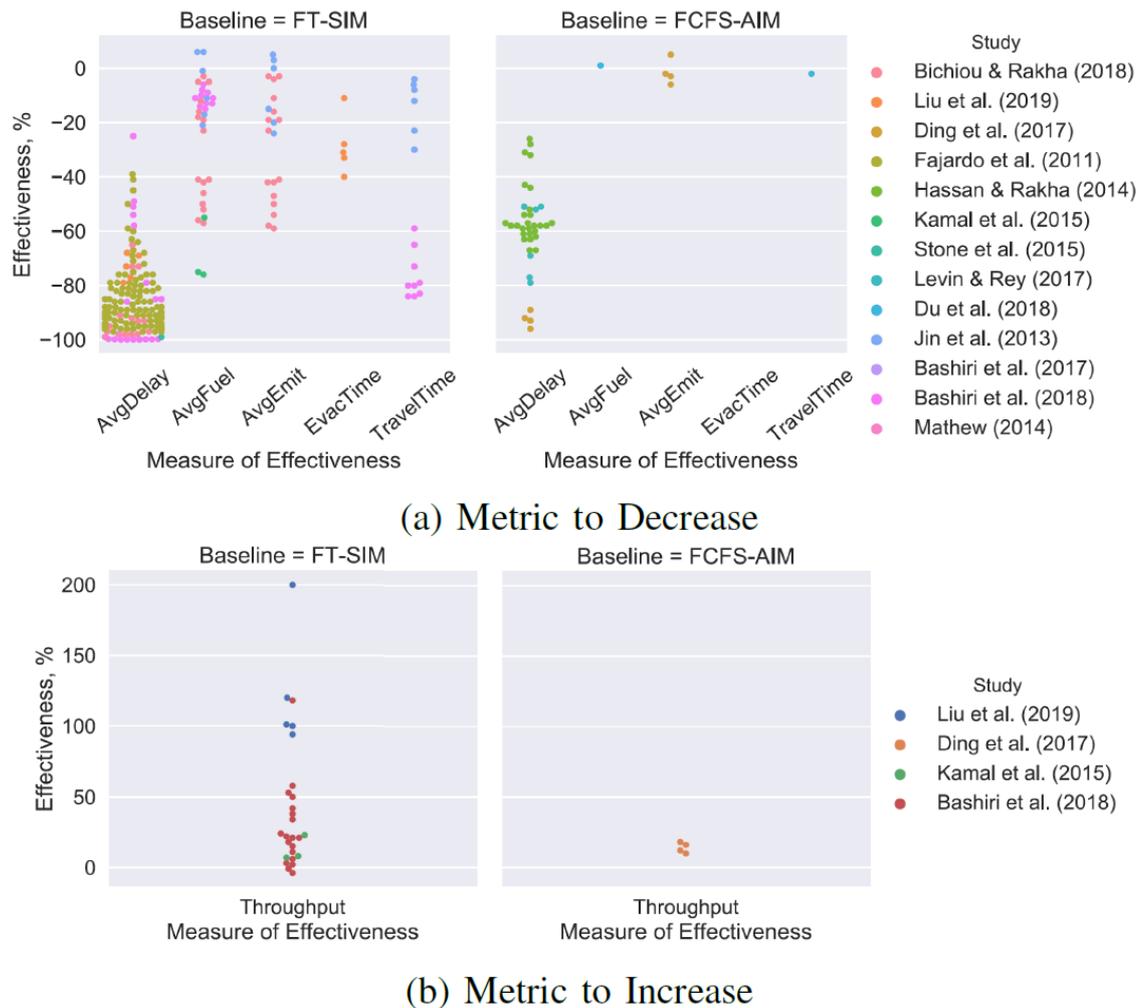


Abbildung 4: Ergebnisse der AIM-Vergleichsstudie von (Zhong et al., 2020).

Die oberen zwei Diagramme zeigen die Leistungskennzahlen, bei denen eine Verkleinerung einer Performancesteigerung entspricht. Bei den unteren zwei Diagrammen gilt, je größer die Leistungskennzahl, desto größer die Performance der Steuerung. Die beiden linken Diagramme stellen die Studienergebnisse dar, die zu einer Festzeitsteuerung verglichen wurden. Die Diagramme in der rechten Hälfte zeigen jene, die ein First-come-first-served AIM Basisszenario verwendet haben. Es lässt sich erkennen, dass die meisten Studien in der Tat die durchschnittliche Wartezeit als Vergleichsmetrik nutzen. Der potenzielle Nutzen der untersuchten AIM zeigt dabei eine sehr große Streuung von ca. 20 % bis zu fast 100 % Reduktion der durchschnittlichen Wartezeiten. Der Verkehrsfluss in einer Studie (B. Liu, Shi, Song, & El Kamel, 2019) konnte fast verdoppelt werden. (Zhong et al., 2020) halten jedoch fest, dass die Ergebnisse mit Vorsicht zu genießen sind. Zunächst kann der Sättigungsgrad einen hohen Einfluss haben, da bei hohen Verkehrsflüssen die Gewährleistung eines sicherheitsbedingten Mindestabstands dazu führen kann, dass die erzielten Kapazitäten verringert werden. Zudem sollte das Benchmark-Szenario dem Stand der Technik entsprechen.

Wie bereits erwähnt, verlangen die meisten AIM-Methoden einen 100-prozentigen Durchdringungsgrad von AVF. Es existieren einige wenige Studien (Au, Zhang, Stone, Zhang, & Stone, 2015; Dresner & Stone, 2007), die sog. Semi-AIM-Methoden vorschlagen, mit denen auch niedrigere Durchdringungsgrade erlaubt werden können. Die Resultate sind jedoch kontrovers, und mehr Forschungsarbeit in diese Richtung ist vonnöten (Zhong et al., 2020).

### 3.4.3.3. Netzweite Verkehrssteuerung

Viele Studien beziehen sich auf einzelne Straßenkreuzungen. Es wurden jedoch vereinzelt auch die Effekte von AVF auf netzweite Steuerungsverfahren untersucht. Diese basieren oft auf dem makroskopischen Fundamentaldiagramm (Geroliminis & Daganzo, 2008), welches die netzweiten Verkehrszustände widerspiegelt. (Yang, Zheng, & Menendez, 2018) entwickeln eine Methodik, die auch trotz hoher Unschärfe in den Daten robust ist. Die gesamte Wartezeit kann in den betrachteten Szenarien erfolgreich verringert werden.

Neuartige Systeme werden verstärkt nicht mehr mit klassischen Reglern entwickelt, sondern nutzen Verfahren der künstlichen Intelligenz, um Fahrstrategien zu wählen und Trajektorien zu planen, und somit die netzweiten Effekte der Automatisierung abzuschätzen. Im bereits erwähnten Forschungsprojekt FLOW wurde gezeigt, dass der Verkehrsfluss in einem Gesamtnetz optimiert werden kann, da die automatisierten Fahrzeuge als eine Art Regler des Verkehrsflusses agieren können. Der entsprechende zu maximierende Verkehrskennwert ist die durchschnittliche Geschwindigkeit.

### 3.4.4. Zusammenfassung

Die in diesem Abschnitt beschriebene Recherche hat ergeben, dass die disruptiven Wirkungen von AVF nicht nur das gesamte Verkehrssystem, sondern auch angrenzende Systeme wie beispielsweise die Landnutzung betreffen können. Innerhalb des Verkehrssystems ist der Verkehrsfluss außerorts ein Aspekt, zu dem bereits eine Vielzahl an Publikationen existiert. Außerorts stehen die Dynamiken des Verkehrsflusses im Fokus der Forschung, und entsprechende Kennwerte sind meist das Fundamentaldiagramm und Streckenkapazitäten. Ein Großteil der Studien geht von einer Kapazitätssteigerung durch AVF aus, es gibt jedoch auch einzelne Ergebnisse, die gegenteiliges, zumindest für niedrigere Durchdringungsgrade behaupten. Zum Verkehrsfluss innerorts existieren weniger Studien. Es wurde bisher gehäuft die Knotenpunktregelung unter Berücksichtigung von AVF erforscht. Die untersuchten Kennwerte sind unter anderem Wartezeiten

und aber auch Kapazitätswerte. Hier werden primär Steigerungen der Kapazität bzw. Verminderungen der Wartezeiten erwartet. Zudem bestehen erste Untersuchungen zum Einfluss von AVF auf der Ebene städtischer Straßennetze. Auch hier werden Kennwerte wie die netzweite Kapazität, oder die durchschnittliche Geschwindigkeit betrachtet.

Die ausgiebige Forschung ändert jedoch nichts an der Tatsache, dass aufgrund der bisher fehlenden Implementierung der Technologie im realen Verkehr noch wenige Daten vorhanden sind. Daher können die verschiedensten Modelle und Verfahren nicht verifiziert werden und die entsprechenden Prognosen sind mit Vorsicht zu genießen. Obgleich der unterschiedlichen Terminologie und verschiedensten Modelle und Annahmen in den existierenden Studien scheint es den Konsens zu geben, dass V2X-Kommunikation und Kooperation zwischen den AF essentiell für substanzielle Verkehrsflusseffizienzsteigerungen auf Autobahnen und im urbanen Raum sein werden. Jene kann mittels Kennwerten wie dem Fundamentaldiagramm, aber auch Wartezeiten und Anzahl an Stopps an Kreuzungen beschrieben werden. Der Großteil der Studien geht davon aus, dass es durch die Automatisierung zu einer Verkehrsflusssteigerung kommen wird und diese durch die Vernetzung noch weiter verstärkt wird.

Mit Hinblick auf existierende Studien zu den Wirkungen von AVF auf den Verkehrsfluss in urbanen Räumen zeigt sich, dass primär künstliche Knotenpunkt- und Netztopologien untersucht wurden. Zudem wurden Verkehrsdynamiken oft unnötig vereinfacht dargestellt. Des Weiteren wurden die entsprechenden Resultate nicht in Bezug zu praxisrelevanten Regelwerken gebracht. Die Ergebnisse können also nicht ohne Weiteres auf echte Straßennetze und entsprechende Bemessungsgrundlagen übertragen werden.

### 3.5. Zukunftsszenarien für den automatisierten und vernetzten Verkehr

Die Ermittlung der Grundlagen hat ergeben, dass speziell für die Untersuchung der potentiellen Leistungssteigerung städtischer Straßennetze für den deutschen Raum Forschungsbedarf existiert. Die bestehenden Studien für den urbanen Raum behandeln primär isolierte Kreuzungen mit künstlichen Topologien und stellen die Verkehrsdynamiken nur vereinfacht dar. Zudem wurden die Ergebnisse größtenteils noch nicht auf existierende Regelwerke und Normen bezogen. Andererseits gibt es vielversprechende Studien zum Thema der mikroskopischen Modellierung von AVF, was es ermöglicht erweiterte Simulationsstudien durchzuführen, um die angesprochene Forschungslücke zu schließen.

Zu diesem Zwecke wird in diesem FE-Projekt eine Simulationsstudie durchgeführt. Dabei werden vier Simulationsszenarien untersucht, deren Analyse und Ergebnisse Beiträge liefern, um die Forschungslücke zu schließen. Dabei liegt der Fokus auf dem Zusammenhang zwischen Automatisierung des Stadtverkehrs und Leistungsfähigkeit der städtischen Straßenverkehrsinfrastruktur. Zusätzlich werden basierend auf den Szenarioergebnissen Vorschläge für die Anpassung von bestehenden Berechnungsverfahren in Handbüchern und Regelwerken unter Berücksichtigung von automatisierten Fahrzeugen erarbeitet und typische Kenngrößen zur Beschreibung des Verkehrsablaufs ausgewertet. Die Ergebnisse der Simulationsstudie dienen also der Abschätzung der Folgen eines AVF-Verkehrssystems, sowie deren Berücksichtigung in der Dimensionierung von Verkehrsinfrastruktur.

Um die insbesondere auf den Durchdringungsgrad von AVF bezogene Unsicherheit genügend zu berücksichtigen, ist eine szenariobasierte Analyse angebracht. Die vier betrachteten Szenarien stellen innerhalb der Bandbreite möglicher Entwicklungen mehrere realistische Entwicklungspfade dar. In einigen Studien wurden bereits mögliche Entwicklungen der Durchdringung automatisierter Fahrzeuge in der Fahrzeugflotte untersucht (Kaltenhäuser, Werdich, Dandl, & Bogenberger, 2020; Krause et al., 2017), welche jedoch auch mit signifikanter Unsicherheit belastet sind. Im Forschungsprojekt ASTRA 2018/005 - Auswirkungen des automatisierten Fahrens (Busch et al., 2020) wurde eine Übersicht der verschiedensten Prognosen durchgeführt, siehe Abbildung 5.

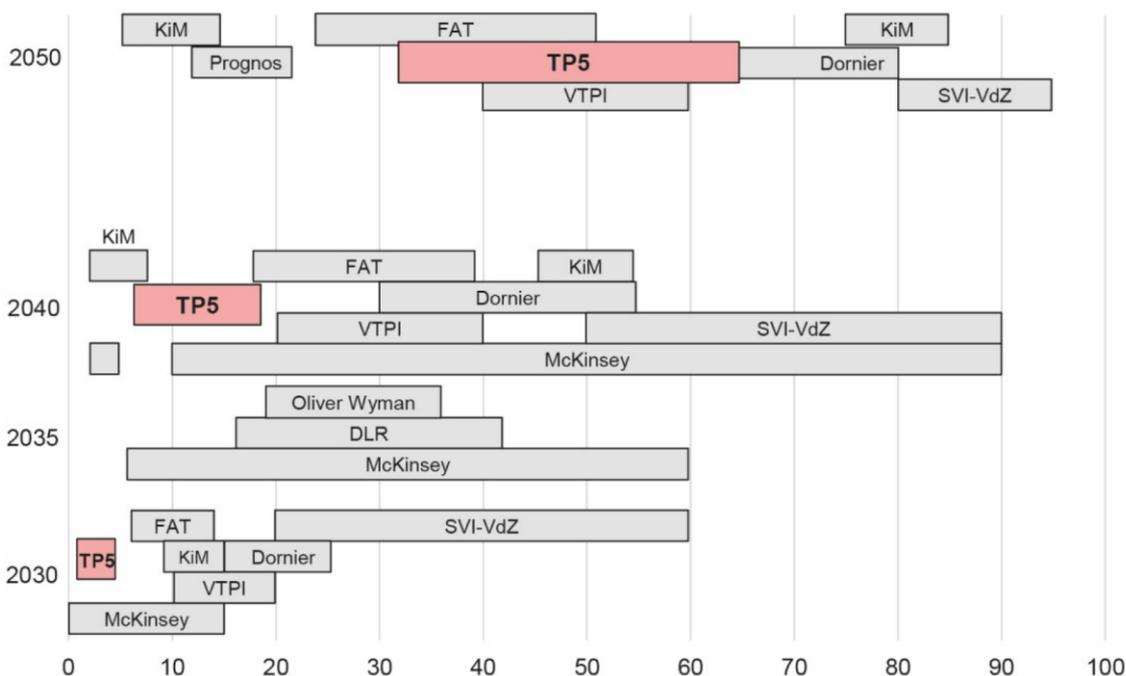


Abbildung 5: Durchdringungsgrad AF (Stufe 4/5) in der Verkehrsflotte nach (Busch et al., 2020).

In der Abbildung zeigt die Y-Achse den Zeithorizont und die X-Achse den prognostizierten Durchdringungsgrad AF in der Fahrzeugflotte. Die grauen Balken entsprechen den Vorhersagen verschiedenster Studien. Die Abbildung stellt sehr gut dar, wie sehr die entsprechenden Ergebnisse zur Entwicklung des Durchdringungsgrades divergieren. Daher wird diese Szenarioanalyse etwas losgelöst vom Zeitraum betrachtet und sich von vornherein auf gewisse Durchdringungsgrade konzentriert.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die einzelnen zu untersuchenden Szenarien detailliert beschrieben. Diese sind neben dem Basisszenario ein konservatives mit noch niedrigem, ein innovatives mit höherem, und ein visionäres Szenario mit sehr hohem Durchdringungsgrad. Eine ähnliche Einteilung wird in (Olstam et al., 2020) vorgeschlagen, welche von drei Stadien der Koexistenz von konventionellen und AVF spricht: einführend, etabliert und vorherrschend. Dann wird auf einzelne Aspekte der Simulation eingegangen, welche für alle Szenarien gültig sind.

### **3.5.1. Basisszenario**

Im Basisszenario wird die aktuell vorherrschende Situation auf den Straßen städtischer Netze modelliert. Hier werden Fahrzeuge modelliert, wie sie bereits heute in der Flotte vorkommen. Das sind weitestgehend Fahrzeuge ohne oder mit einem niedrigen Level der Automatisierung. Die Fahrer werden zwar schon häufig in ihrer Fahraufgabe durch technische Systeme unterstützt, allerdings können sie jederzeit aufgefordert werden in das Geschehen einzugreifen. Insbesondere im städtischen Verkehr sind die Funktionsweisen aktiv unterstützender Systeme, die das Fahrverhalten der Fahrzeuge substantiell verändern würden, limitiert. Daher werden keine FAS im Basisszenario integriert.

Die Resultate der Simulationsstudie sollen dazu verwendet werden den im HBS (FGSV, 2015a) und anderen Richtlinien vorkommenden Berechnungsmethoden Korrekturfaktoren, welche das AVF berücksichtigen, zuzuweisen. Daher muss die Modellierung des Fahrverhaltens konventioneller Fahrzeuge möglichst konform zu den genannten Richtlinien sein. Die entsprechenden Modelle werden also angepasst, um konform mit den entsprechenden HBS-Modellen zu sein. Dabei wird speziell das Fundamentaldiagramm im HBS in den Fokus gerückt. Erst durch diese Angleichung der Simulationsparameter kann eine sinnhafte Ableitung von Korrekturfaktoren im Zuge der verkehrstechnischen Berechnungen (Kapitel 4) erfolgen.

### **3.5.2. Konservatives Szenario**

Das konservative Szenario soll eine Zukunft abbilden, in der sich die Entwicklung der Fahrzeugflotte der betrachteten Region so fortsetzt, wie es aus der Vergangenheit bekannt ist. In (Busch et al., 2020) wurde solch ein sog. Trendszenario für die Schweizer Fahrzeugflotte aus Zulassungszahlen und Annahmen über Einführung von automatisierten Fahrzeugen und deren Anteile in den Neuzulassungen geschätzt. In ähnlicher Form kann solch eine Hochrechnung für den Kontext des Projektes geschehen. Dabei ist davon auszugehen, dass die Ausstattung eines Fahrzeugs mit automatisierten Fahrfunktionen mit hohen Kosten einhergehen wird. Daher ist auch bei einer baldigen Verfügbarkeit solcher Funktionen nicht anzunehmen, dass alle neuen Fahrzeuge auch damit ausgestattet werden. Des Weiteren wird in diesem Szenario davon ausgegangen, dass der Großteil der Fahrzeuge der Flotte weiterhin im Besitz von Privatpersonen ist. Das bedeutet auch, dass Fahrzeuge für eine gewisse Dauer in der Flotte verbleiben und das Durchschnittsalter der Fahrzeugflotte relativ hoch ist. Zeitlich ordnet sich dieses Szenario, in dem eine Durchdringung von ca. 1/3 automatisierter und vernetzter Fahrzeuge in der Fahrzeugflotte erwartet wird, etwa in die Zeitspanne der Jahre 2030 bis 2040 ein. Diese grobe Einordnung wird auch in anderen Einschätzungen und Studien zur Entwicklung des Durchdringungsgrades geteilt (Kaltenhäuser et al., 2020; VDA, 2015).

Es wird weiter davon ausgegangen, dass keine aktive Steuerung der AVF durch eine zentrale Optimierungseinheit aktiv ist. Das bedeutet, Kapazitätssteigerungen werden lediglich aus den kürzeren zeitlichen Abständen zwischen den Fahrzeugen, sowie der verbesserten Signalphasenplanung dank dem Datenaustausch zwischen Infrastruktur und AVF entstehen. Es wird angenommen, dass nach wie vor eine verkehrsabhängige Verkehrssteuerung aktiv sein wird, aber AF und Lichtsignalanlagen noch nicht kooperativ agieren.

### **3.5.3. Innovatives Szenario**

Das innovative Szenario stellt eine Zukunft des städtischen Verkehrs dar, in der insbesondere durch Politik und Verkehrsmanagementmaßnahmen die Automatisierung des Straßenverkehrs vorangetrieben wird. Die Durchdringung von AVF in der Fahrzeugflotte ist größer (hier wird mit einer Größenordnung von ca. 2/3 gerechnet) als im zuvor beschriebenen konservativen Szenario, da beispielsweise angenommene Restriktionen bzw. gesetzliche Vorgaben einen gewissen Automatisierungsgrad der Fahrzeuge voraussetzen, um bestimmte Bereiche befahren zu dürfen. Ein derartiges Szenario ist maßgeblich von rechtlichen und politischen Entwicklungen der Rahmenbedingungen für

AVF abhängig und kann in Deutschland in der Zeitspanne zwischen 2040 und 2050 erwartet werden (siehe (Busch et al., 2020) für Vergleich von Prognosen). Die Ausstattung der Straßeninfrastruktur mit Kommunikationseinrichtungen erlaubt innovative Lösungen im Bereich des Verkehrsmanagements und ist damit ein weiterer Treiber der Automatisierung (Busch et al., 2020). Diese Maßnahmen können in der Bevölkerung auch als Anreiz für die Nutzung von automatisierten Fahrzeugen dienen (Milakis et al., 2017). Auch die Konzepte der Fahrzeuge selbst können Änderungen erfahren. Durch eine verstärkte Nutzung geteilter Fahrzeuge ist es beispielsweise denkbar, dass vermehrt neue Fahrzeuge in der Fahrzeugflotte vorhanden sind (Milakis et al., 2017). Dadurch können auch neue Technologien die Flotte schneller durchdringen und es gibt früher einen substantiellen Anteil automatisierter Fahrzeuge in der Gesamtflotte als im konservativen Szenario. Solch ein Szenario ist insbesondere im städtischen Kontext denkbar.

In diesem Szenario werden zusätzlich zum geänderten Fahrverhalten der AF auch infrastrukturelle und Verkehrsmanagement-spezifische Änderungen mit dem Ziel geprüft, Kapazitätssteigerungen herbeizuführen. Dabei werden im Speziellen der Einsatz von temporärer Fahrstreifenfreigabe bzw. der Sonderfahrstreifeneinrichtung für AF untersucht. Diese bestehen aus einer temporären Freigabe einzelner Fahrstreifen ausschließlich für AVF und bedingen eine Anpassung der Verkehrssteuerung an den entsprechenden Knotenpunkten, um Kapazitätssteigerungen zu erzielen. Zusätzlich könnte der Verkehr über eine aktive Steuerung von AVF beeinflusst werden (wie im Projekt FLOW vorgeschlagen), um eine netzweite Steigerung der Leistungsfähigkeit zu erzielen.

#### **3.5.4. Visionäres Szenario**

Das letzte Szenario, das innerhalb des Projektes betrachtet wird, beschreibt eine Zukunft mit einer Vielzahl an AVF. Dieses visionäre Szenario besteht weitestgehend aus Fahrzeugen der Automatisierungsgrade 4 und 5, ist dahingehend realistisch, als dass betrachtet wird, dass einige Fahrzeuge vermutlich auch in ferner Zukunft noch durch Menschen gesteuert werden. Die Realisierung eines solchen Szenarios wird nicht vor dem Jahr 2050 erwartet.

In diesem Szenario wird die Kapazitätssteigerung substantiell durch innovative Steuerung von signalisierten Knotenpunkten erzielt werden. Es werden weitgehende Anpassungen in der Steuerung des Verkehrsablaufs vorgenommen. So können beispielsweise Knotenpunktregelungen durch Kooperation von AVF und Lichtsignalanlagen (siehe Abschnitt 3.4.3.1) oder dank Semi-AIM (siehe Abschnitt 3.4.3.2) verbessert werden, um

verkehrseffiziente Lösungen zu erreichen. Zudem können gewisse wichtige Straßenzüge ausschließlich für AVF freigegeben werden, um dort dank visionärem AIM noch größere Kapazitätsgewinne zu erzielen.

### 3.5.5. Szenarioaspekte

#### 3.5.5.1. Modellierung des Fahrverhaltens

Die Modellierung des Fahrverhaltens ist eine der Kernaufgaben dieses Projekts und wird einen entscheidenden Einfluss auf die finalen Resultate haben. Die daraus entspringende Relevanz einer möglichst realitätsgetreuen und durchdachten Modellierung steht der Tatsache gegenüber, dass noch keine großen empirischen Studien zum AVF durchgeführt werden konnten, da die Technologie noch nicht im Einsatz ist.

Das europäische Forschungsprojekt CoEXist (CoEXist Consortium, 2020) erforschte mögliche mikroskopische Modellierungsansätze. Innerhalb des Projekts waren einige wenige AVF im Einsatz, die es erlaubten auf Basis dieses Datensatzes erste Modellkalibrierungen durchzuführen. Diese wurden in der Veröffentlichung von (Olstam et al., 2020) detailliert beschrieben, welche neben kalibrierten Wiedemann 99 – Modellparametern auch eine Unterteilung der Automatisierungsstufen in Fahrzeugklassen und Fahrlogiken darstellt (siehe Abschnitt 3.3.2.5).

In der Szenarioanalyse wird auf diese aktuelle Veröffentlichung zurückgegriffen und deren vorgeschlagenen Modellierungsansätze implementiert. Dadurch kann sichergestellt werden, dass der Stand der Forschung als auch indirekt Daten aus dem Forschungsprojekt CoEXist berücksichtigt werden.

#### 3.5.5.2. Untersuchte Infrastrukturelemente

Die detaillierte Auswahl der zu untersuchenden Infrastrukturelemente wird in Kapitel 4 beschrieben. In einer Vorauswahl wurden jedoch bereits drei Straßenzugstypen ausgewählt:

- **Typ 1:** Dieser Straßenzug beinhaltet primär nichtsignalisierte Knoten mit drei und vier Armen, sowie einstreifige Straßen. Damit besteht er aus Elementen, die in Deutschlands Straßennetz am häufigsten vorkommen (UR:BAN Konsortium, 2016). Diese Erschließungsstraßen werden nicht direkt von etwaigen Verkehrssteuerungs- oder Managementmaßnahmen betroffen sein. Dennoch können sich Kapazitätswerte aufgrund AVF ändern.

- **Typ 2:** Dieser Straßenzug besteht aus signalisierten Kreuzungen mit ein- bis zweistreifigen Straßen. Diese Hauptstraßen kommen in Städten aller Art häufig vor (UR:BAN Konsortium, 2016) und bilden somit ein wichtiges Element der städtischen Straßeninfrastruktur.
- **Typ 3:** Dieser Straßenzug stellt sehr große und kapazitiv wichtige Straßen dar, welche zwei- bis dreistreifig sind und über komplexe signalisierte Knoten verbunden sind. Auch wenn solche Straßenzüge zahlenmäßig selten vorkommen (UR:BAN Konsortium, 2016), bilden sie doch das Rückgrat mittlerer und großer Städte und beeinflussen die gesamte netzweite Kapazität maßgeblich. Zudem könnte für solche Straßenzüge ein innovatives Verkehrsmanagement, welches die Potentiale des AVF ausnutzt, von großem Interesse sein.

## 4. Verkehrstechnische Berechnungen

### 4.1. Zielsetzung

Aufbauend auf den gewonnenen Grundlagen zur Modellierung von AVF (vgl. Abschnitt 3.3), zu Wirkungen der AVF (vgl. Abschnitt 3.4) sowie zu den skizzierten Zukunftsszenarien (vgl. Abschnitt 3.5) werden in diesem Kapitel die entsprechend durchgeführten verkehrstechnischen Berechnungen dokumentiert. Das Ziel der Berechnungen ist die simulationsbasierte Ermittlung von Korrekturfaktoren für bemessungsrelevante Parameter und Kenngrößen, um die durch AVF ausgelöste Veränderung der Leistungsfähigkeit und Verkehrsqualität von städtischen Knotenpunkten bzw. Streckenzügen zu quantifizieren. Dazu wurden vier verschiedene Streckenzüge modelliert, die eine große Bandbreite an repräsentativen Charakteristiken von Infrastrukturelementen urbaner Verkehrssysteme abdecken. Die Simulationsmodelle basieren auf in der Vergangenheit am Lehrstuhl für Verkehrstechnik der TU München abgeschlossenen Projekten sowie öffentlich zugänglichen Fallbeispielen und können dadurch mit einer hohen Qualität aufwarten. Durch eine schrittweise Erhöhung der modellierten Verkehrsnachfrage wird die Leistungsfähigkeit der Knotenpunkte und Streckenzüge ermittelt. Die Berechnungen werden mittels der Software SUMO durchgeführt, welche vom DLR entwickelt wurde und dort aktuell gepflegt wird (Lopez et al., 2018). Die Ergebnisse sollen als Hinweise verstanden werden, unter welchen infrastrukturellen Randbedingungen eine Leistungssteigerung urbaner Straßennetze durch AVF möglich ist und wie sich dies im Regelwerk zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen abbilden lässt.

Das Kapitel ist wie folgt gegliedert: Zuerst wird in Abschnitt 4.2 ein Überblick über das generelle Vorgehen gegeben, bevor die Auswahl der zu untersuchenden Streckenzüge in Abschnitt 4.3 dargestellt wird. Anschließend werden die Simulationsmodelle der Streckenzüge in Abschnitt 4.4 erläutert, sowie die einzelnen Szenarien konkret beschrieben. In Abschnitt 4.5 werden die angewandten Leistungskennzahlen und Indikatoren vorgestellt. In Abschnitt 4.6 wird dann die Berechnung von Korrekturfaktoren erklärt, welche sich auf die Verkehrsmodelle im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) beziehen. Deren Berechnung bedingt die Anpassung der verwendeten Modelle des Fahrverhaltens (Fahrer-Fahrzeug-Parameter), um die HBS-Modellierungsergebnisse möglichst gut in der Simulation zu repräsentieren. Diese Modellanpassung wird in Abschnitt 4.7 näher erklärt. Die Ergebnisse der verkehrstechnischen Berechnungen werden dann in Abschnitt 4.8 vorgestellt und in Abschnitt 4.9 diskutiert.

## 4.2. Vorgehen

Um die verkehrstechnischen Berechnungen durchführen und Korrekturfaktoren ermitteln zu können, wird in fünf Schritten vorgegangen. Im ersten Schritt werden repräsentative Streckenquerschnitte und Knotenpunkte identifiziert. Diese Auswahl orientiert sich an den einschlägigen Richtlinien sowie an der TU München erfolgten Vorarbeiten (z.B. Projekt UR:BAN (UR:BAN Konsortium, 2016)). Dieser so entstandene Katalog wird anschließend in einem zweiten Schritt mit realen Infrastrukturelementen in bestehenden kalibrierten mikroskopischen Verkehrsmodellen abgeglichen. In einem dritten Schritt werden sich aus den in Schritt 2 identifizierten Infrastrukturelementen zusammensetzende repräsentative Streckenzüge identifiziert. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit, die Streckenelemente sowohl isoliert als auch in einem Streckenzug eingebettet zu simulieren. Ausgewählte Elemente und Streckenzüge werden anschließend in einem vierten Schritt simuliert, um final in Schritt 5 die Änderungen der verkehrlichen Kenngrößen auszuwerten bzw. zu berechnen. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 6 übersichtlich dargestellt. In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Schritte nochmals näher erläutert. Die ersten drei Schritte werden dabei in den folgenden Abschnitten 4.3.1 und 4.3.2 zur Auswahl der zu untersuchenden Streckenzüge zusammengefasst. Die simulations- und korrekturfaktorbezogenen Schritte werden anschließend separat in Abschnitt 4.4 erläutert.

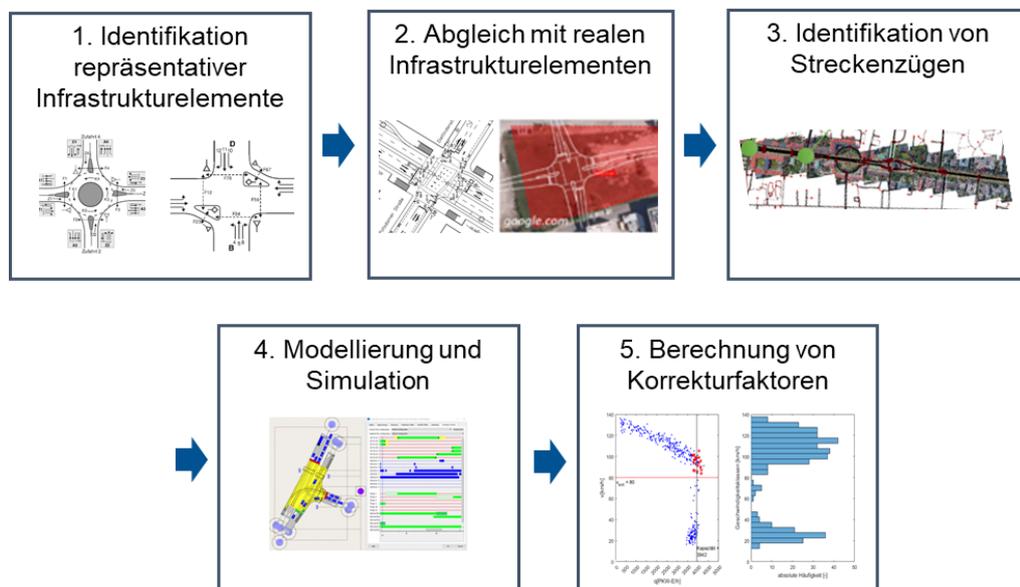


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur verkehrstechnischen Berechnung

## 4.3. Auswahl der Streckenzüge

### 4.3.1. Identifikation repräsentativer sowie relevanter Infrastrukturelemente

Als erster Schritt hat die Element-Kategorisierung das Ziel, einen Katalog an repräsentativen typischen Infrastrukturelementen zu erstellen. Hierbei wird vor allem auf bestehende Regelwerke sowie das erfolgreich abgeschlossene Forschungsprojekt URBAN aufgebaut (UR:BAN Konsortium, 2016).

#### 4.3.1.1. Regelwerke

Die Regelwerk-basierte Beurteilung erfolgt im Wesentlichen auf Basis der Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung (RIN) (FGSV, 2008), der Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt) (FGSV, 2006b) sowie des HBS. Die dort identifizierten Elemente sind wie folgt in Strecken und Knotenpunkttypen und -formen unterteilt:

- Anbaufreie Hauptverkehrsstraßen (RIN Kategorie VS II und VS III)
- Angebaute Hauptverkehrsstraßen (RIN Kategorie HS III und HS IV)
- Erschließungsstraßen (RIN Kategorie ES IV und ES V)
- Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage (LSA)
- Knotenpunkte ohne LSA:
  - Einmündungen und Kreuzungen mit Vorfahrtbeschilderung
  - Kreisverkehre mit Vorfahrtbeschilderung
  - Einmündungen und Kreuzungen mit der Regelung "rechts vor links"
- Kreisverkehre:
  - Minikreisverkehr
  - Kleiner Kreisverkehr

#### 4.3.1.2. Forschungsprojekt URBAN

Ergänzend zu den Richtlinien kann der Forschungsnehmer auf interne Vorarbeiten zurückgreifen. So wurden im Forschungsprojekt UR:BAN sowie weiteren F+E-Vorhaben seitens der TU München Knotenpunktformen und Häufigkeiten für ein repräsentatives Untersuchungsgebiet in Deutschland ermittelt. Diese wurden u.a. auch in (Gerstenberger, 2015) beschrieben und werden in diesem Projekt als zusätzliche Grundlage zum Aufbau bzw. zur Auswahl repräsentativer Simulationsnetze verwendet. Abbildung 7 bis Abbildung 9 zeigen die häufigsten Knotenpunktformen (Einmündung und

Kreuzung) und Knotenpunktzufahrtstypen. Die dargestellten Knotenpunktformen entsprechen knapp 79 % aller urbanen Knotenpunkt-Typen, die dargestellten Knotenpunktzufahrtstypen knapp 58 %. Die restlichen Formen und Typen sind komplexer und lassen sich nicht sinnvoll kategorisieren. Die relativen Häufigkeiten der einzelnen Formen und Typen sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 2: Relative Häufigkeit der betrachteten Knotenpunktformen in Deutschland

Knotenpunktform	E1	E2	E3	E4	E5	E6	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Relative Häufigkeit [%]	15	2	11	1	<0,1	2	27	2	14	1	4	<0,1

Tabelle 3: Relative Häufigkeiten der betrachteten Knotenpunktzufahrtstypen in Deutschland

Knotenpunktzufahrtstyp	A11	A22	A21	A23	A33	A212
Relative Häufigkeit [%]	23	16	5,2	5	4,6	4

Bei Betrachtung der verschiedenen Knotenpunktformen fällt auf, dass die häufigsten Formen jene mit einstreifigen Kreuzungsarmen sind. Dies scheint ein plausibles Ergebnis zu sein, da diese Formen Erschließungsstraßen in klassischen Wohn- und Industriegebieten verbinden, welche das Gros der Stadtfläche ausmachen. Mehrere Fahrstreifen werden hochkapazitiven Streckenzügen zugeordnet, welche eine Verbindungsfunktion ausüben und daher weniger häufig vorkommen.

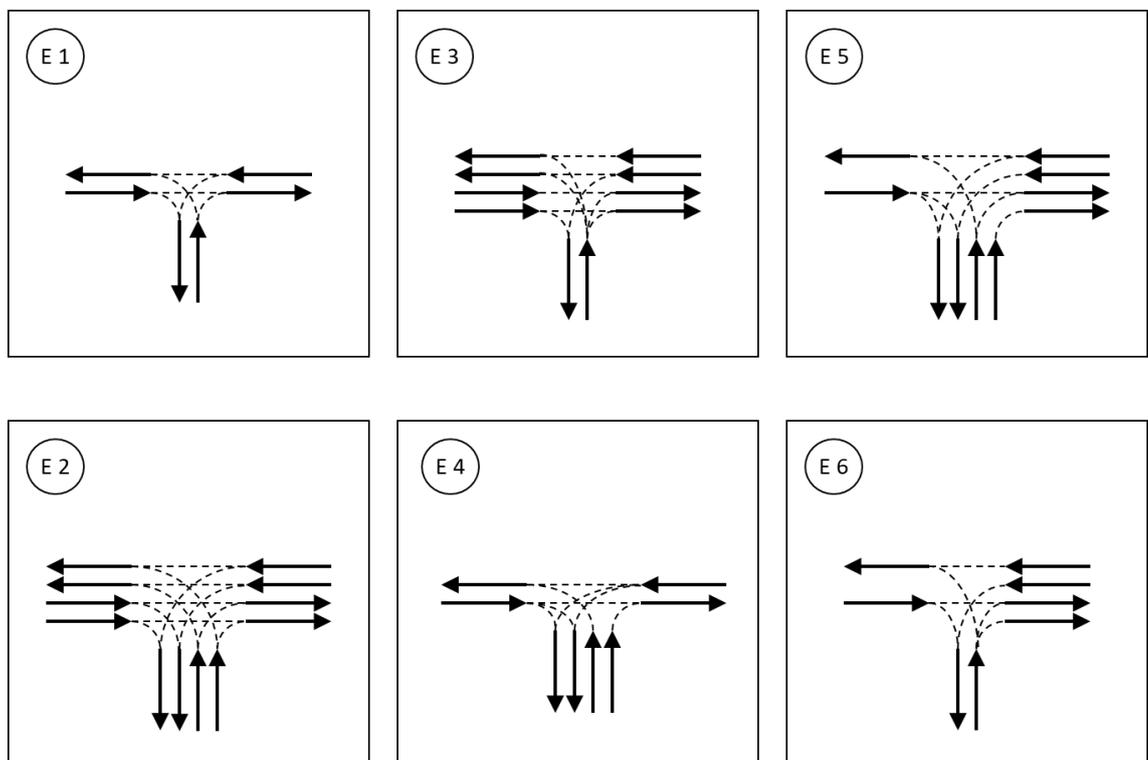


Abbildung 7: Häufige Knotenpunktformen (dreiarstig)

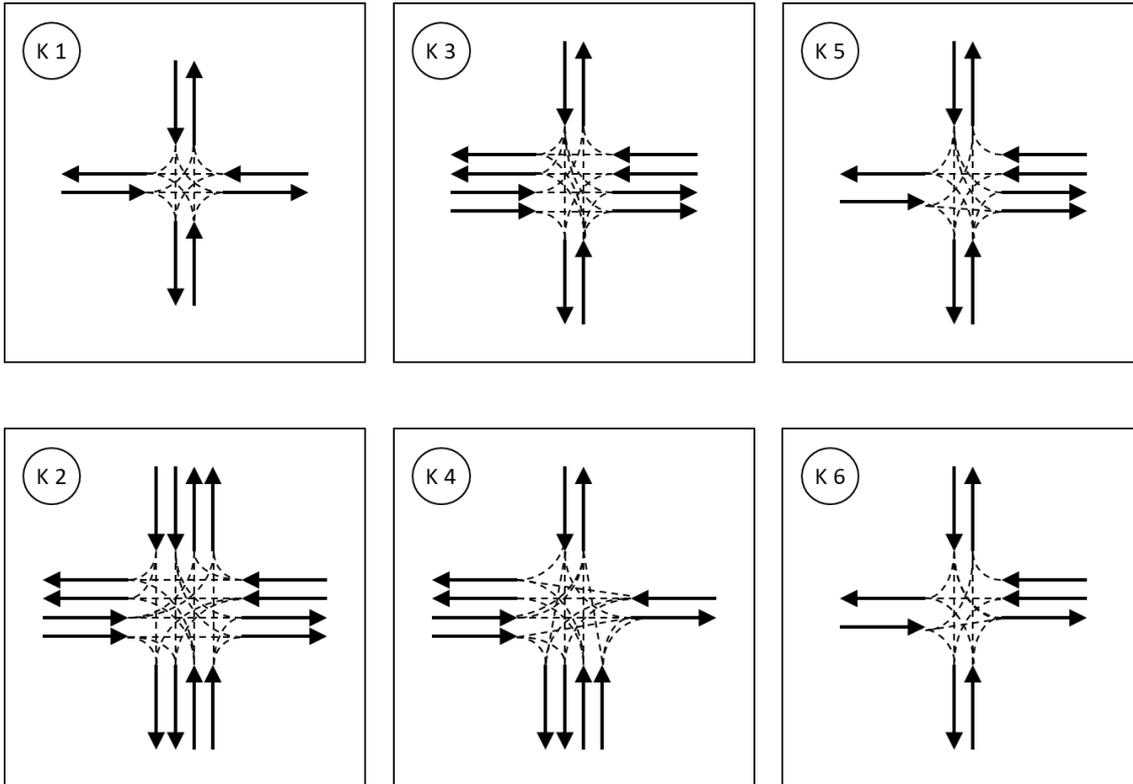


Abbildung 8: Häufige Knotenpunktformen (vierarmig)

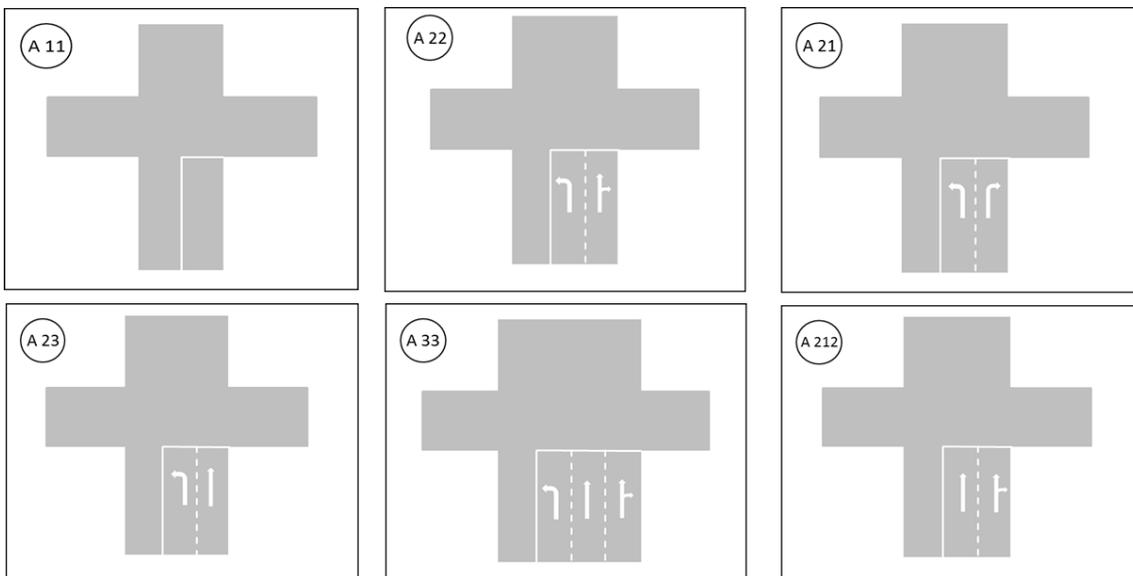


Abbildung 9: Häufige Knotenzufahrtstypen

### 4.3.1.3. Rolle von mehrstreifigen Streckensegmenten

Es ist zu beachten, dass der Hauptfokus des Projekts auf den Simulationen und der Datenauswertung auf den höherkapazitiven Typen und Formen liegt, da es das übergeordnete Ziel des Projekts ist, die Leistungssteigerung städtischer Straßen zu untersuchen. Erschließungsstraßen mit einem Fahrstreifen pro Richtung, vorfahrtsgeregelte

Knotenpunkte, Knotenpunkte mit Rechts-vor-links-Regelungen sowie kleine Kreisverkehre tragen weniger zur übergeordneten Leistungsfähigkeit bei.

Um die Annahme eines höheren Beitrags einzelner Infrastrukturelemente zur Leistungsfähigkeit des Netzes zu bestätigen, wird auf ein dem Lehrstuhl zur Verfügung stehendes Simulationsmodell der Stadt München zurückgegriffen. Das Netz besteht aus einer Vielzahl an Streckensegmenten mit verschiedenen Längen und Anzahlen an Fahrstreifen. Tabelle 4 zeigt neben der Gesamtlänge der Segmente auch den relativen Anteil dieser nach der entsprechenden Anzahl an Fahrstreifen aufgeschlüsselt. Die Tabelle zeigt, dass der Großteil aller Segmente lediglich einen Fahrstreifen hat. Segmente mit fünf oder sechs Fahrstreifen kommen nur an großen Knotenpunkten vor, an denen entsprechende Abbiegespuren existieren.

Tabelle 4: Streckensegmente nach der Anzahl an Fahrstreifen

Anzahl Fahrstreifen [-]	Gesamtlänge [km]	Relative Häufigkeit [%]	Summe der Fahrleistung [Fz*km]
1	1671,7	66,2	5.586.870
2	479,1	19,0	5.938.780
3	255,1	10,1	6.269.490
4	103,0	4,1	3.835.700
5	16,9	0,7	782.610
6	0,3	>0,1	6.860

Um die Rolle eines Streckensegmentes für die Kapazität des Netzes zu untersuchen, wird auf die Kenngröße der normierten Fahrleistung zurückgegriffen. Diese entspricht der Summe der gefahrenen Kilometer pro Stunde. Diese Kennzahl vereint sowohl den Einfluss der Segmentlänge als auch jenen der Anzahl der Fahrstreifen in einem Segment. Um die normierte Fahrleistung zu untersuchen, wird die mikroskopische Simulation des Münchener Netzes für einen Zeithorizont von 24 h durchgeführt und die gefahrenen Fahrzeugkilometer auf jedem Streckensegment werden aufgezeichnet.

In Tabelle 4 wird die Summe der normierten Fahrleistung über die 24 h aufgeführt. Zudem sind die Ergebnisse in Abbildung 10 dargestellt. Die normierte Fahrleistung ist auf der y-Achse in  $[Fz \text{ km/h}] * 10^6$  und die Zeit in [h] auf der x-Achse dargestellt. Die unterschiedlichen Einfärbungen entsprechen der Anzahl Fahrstreifen eines Streckensegments. Strecken mit höherer Kapazität haben per Definition mehrere Fahrstreifen. Es fällt auf, dass die Fahrleistung auf einstreifigen Streckensegmenten gegeben dem entsprechenden Anteil solcher Segmente an der gesamten Netzwerklänge gering ist. Es ist klar ersichtlich, dass die Summe der Streckenelemente mit mehr als einem Fahrstreifen einen deutlich größeren Beitrag zur gesamten Fahrleistung liefert. Während die Summe

der normierten Fahrleistung über den Tag variiert, scheint diese Schlussfolgerung durchgehend gültig zu sein. Daraus lässt sich schließen, dass mehrstreifige Streckenelemente, auch wenn sie einen geringeren Anteil am Gesamtnetz ausmachen, ausschlaggebend für die Kapazität städtischer Straßennetze sind. Zudem zeigt die Auswertung, dass das verkehrliche Ziel, Verkehr in urbanen Netzen auf leistungsfähigen Straßen zu bündeln, im gegebenen Fall erreicht wird.

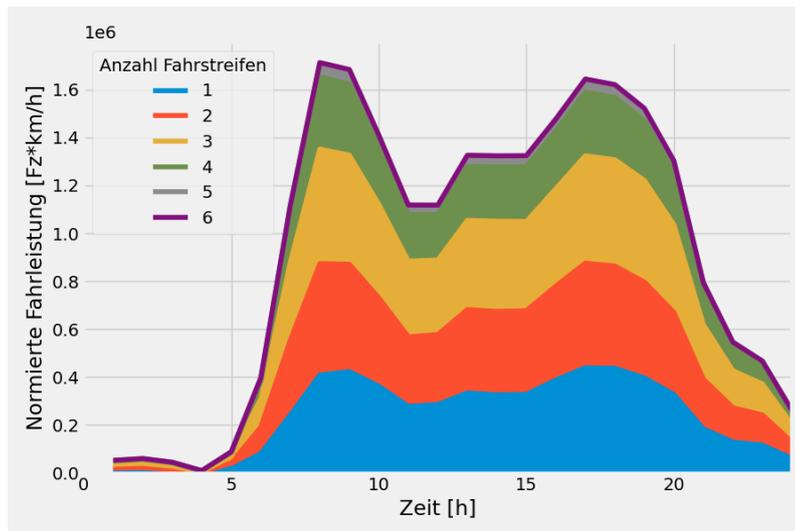


Abbildung 10: Normierte Fahrleistung aufgeteilt nach Anzahl Fahrstreifen pro Streckensegment für eine Simulation Münchens

#### 4.3.1.4. Ausgewählte Infrastrukturelemente für die weitere Bearbeitung

Die Identifizierung häufig vorkommender Infrastrukturelemente, sowie die Untersuchung der Rolle verschiedenster Streckensegmente auf die normierte Fahrleistung zeichnen ein gegensätzliches Bild. Insbesondere jene Streckensegmente, welche im urbanen Raum häufig vorkommen, tragen relativ wenig zur Fahrleistung bei. Dies soll bei der Auswahl von Streckenzügen im weiteren Verlauf berücksichtigt werden.

Einerseits wird darauf geachtet, dass die häufigsten Knotenpunktformen und Knotenpunktzufahrtstypen zumindest einmal vorkommen, auch wenn sie wenig zur Fahrleistung beitragen und damit eine geringe Rolle für die Kapazität spielen. Daher wird mindestens ein Streckenzug auch einstreifige Segmente beinhalten. Zudem wird der Fokus aber auf mehrstreifigen Segmenten liegen, d.h. dass auch an Knotenpunkten bis zu vier Fahrstreifen pro Richtung existieren. Damit werden all jene Segmente modelliert, auf welchen das Gros der Fahrleistung erbracht wird (siehe Abbildung 10). Neben diesen streckenbezogenen Aspekten sollen auch verschiedene Knotenpunkttypen gemäß den

Regelwerken vorkommen, d.h. vier- und dreiarmige sowie signalisierte und nicht-signalisierte Knotenpunkte. Zuletzt sollen auch multimodale Aspekte untersucht werden. Daher wird in einem Streckenzug auch Fahrradverkehr und öffentlicher Nahverkehr modelliert.

#### **4.3.2. Abgleich mit realen Infrastrukturelementen & Identifikation von Streckenzügen**

In diesem Schritt werden Streckenzüge identifiziert, die einerseits häufig vorkommende Infrastrukturelemente beinhalten, aber andererseits auch eine wichtige Rolle für die Kapazität des gesamten Straßennetzes darstellen. Das Vorgehen hierbei ist es, Streckenzüge aus der Simulationsmodellbibliothek der TU München auszuwählen, die auf einen hohen Bestandteil der in Abschnitt 4.3.1 vorgestellten Kategorien schließen lassen und im Nachgang konkret zu überprüfen, in welchem Umfang und mit welchen Abweichungen die entsprechenden Infrastrukturelemente enthalten sind.

Im Zuge des Projekts wurden vier Streckenzüge für die weiteren Untersuchungen ausgewählt, die nun im Folgenden vorgestellt werden. Für die Auswahl der Streckenzüge wird auf die kalibrierten Simulationsmodelle Ingolstadts aus dem Projekt SAVe (SAVe Consortium, 2021) und Münchens aus dem Projekt RASCH (Keler, Grigoropoulos, Kath, & Spangler, 2018) zurückgegriffen. Entsprechende Details zu den jeweiligen Modellen sind in Abschnitt 4.4 zu finden.

- **Streckenzug Typ 1 – „Ingolstadt klein“ (IK):** Dieser Streckenzug beinhaltet primär nichtsignalisierte drei- und vierarmige Knoten, sowie einstreifige Straßenabschnitte. Damit besteht er aus Elementen, die in Deutschlands Straßennetz am häufigsten vorkommen (UR:BAN Konsortium, 2016). Dadurch wird sichergestellt, dass jene Infrastrukturelemente im Projekt berücksichtigt werden, die zwar nicht maßgeblich zur Fahrleistung eines Hauptstraßennetzes beitragen, aber mengenmäßig dominant sind. Diese Streckenzüge werden nicht direkt von etwaigen zukünftigen Verkehrssteuerungs- oder Managementmaßnahmen betroffen sein. Eine Erhöhung der Kapazitätskennwerte könnte daher eher aus den geringeren Fahrzeugfolgezeiten der AVF folgen.

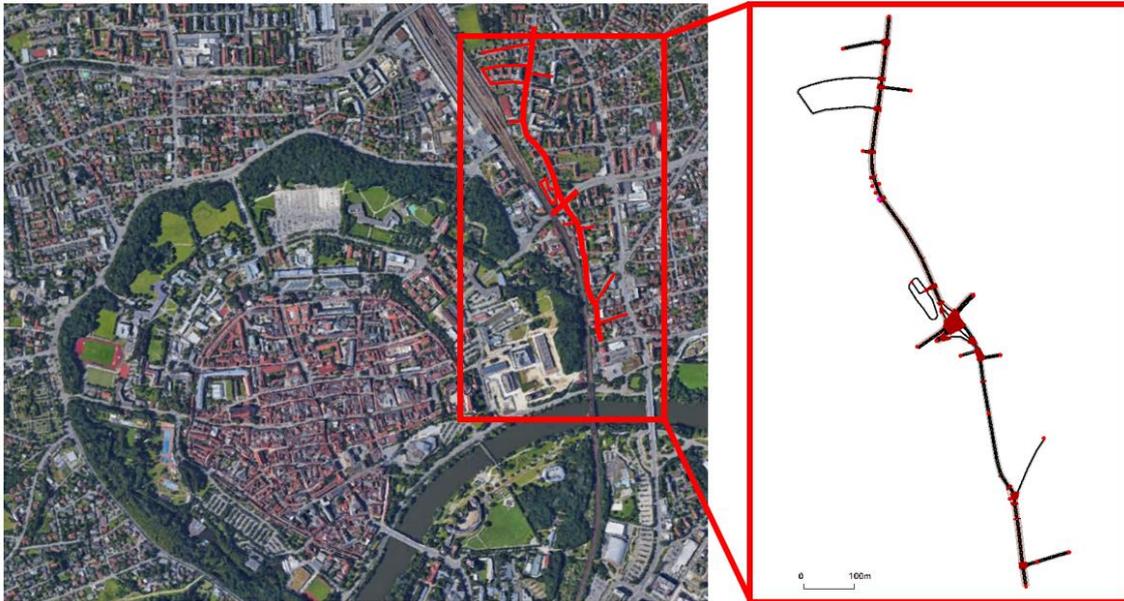


Abbildung 11: Streckenzug IK

- **Streckenzug Typ 2 – „Ingolstadt mittel“ (IM):** Dieser Streckenzug östlich des Streckenzugs Typ 1 entlang der Bundesstraße B13 besteht aus signalisierten Kreuzungen mit ein- bis zweistreifigen Straßen. Diese angebauten Hauptverkehrsstraßen mit hoher Erschließungsintensität kommen in Städten aller Art häufig vor und bilden somit ein wichtiges Element der städtischen Straßeninfrastruktur (UR:BAN Konsortium, 2016). Durch das Vorhandensein von mehreren Fahrstreifen sowie signalisierten Knotenpunkten lassen sich hier auch die Effekte von Verkehrssteuerungsmaßnahmen untersuchen.

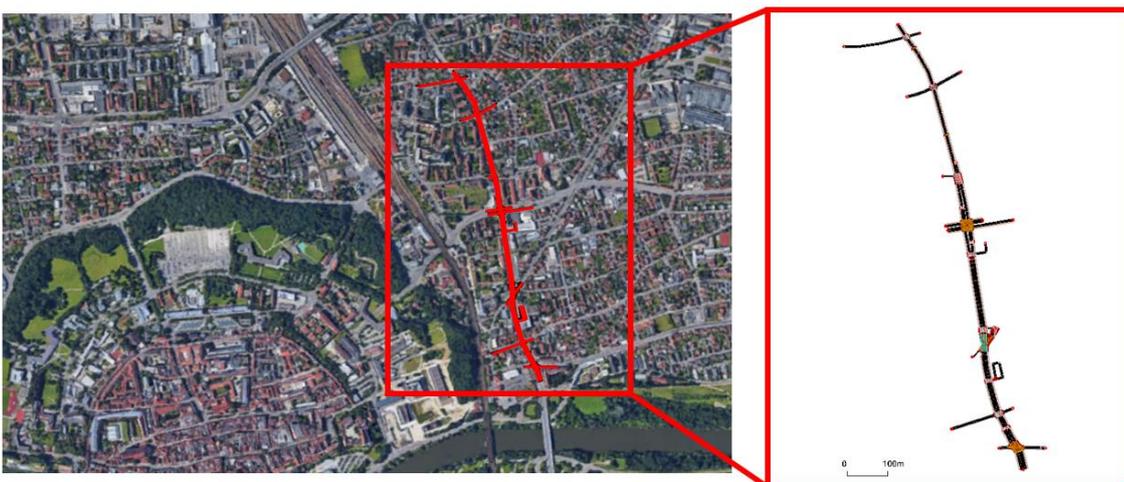


Abbildung 12: Streckenzug IM

- **Streckenzug Typ 3 – „Ingolstadt groß“ (IG):** Dieser Streckenzug liegt ebenfalls auf der B13 (westliche und nördliche Ringstraße) und vertritt hochkapazitive Inf-

rastrukturelemente, welche der Klasse der anbaufreien Hauptverkehrsstraße zugeordnet werden können. Es sind teilweise zwei bis drei Fahrstreifen vorhanden und die einzelnen Strecken sind unter anderem mit signalisierten Knotenpunkten verbunden. Auch wenn solche Streckenzüge zahlenmäßig selten vorkommen (UR:BAN Konsortium, 2016), bilden sie doch das Rückgrat mittlerer und großer Städte und beeinflussen die gesamte netzweite Kapazität maßgeblich. Zudem könnte für solche Streckenzüge ein innovatives sowie visionäres Verkehrsmanagement, welches die Potentiale des AVF ausnutzt, von Vorteil sein.

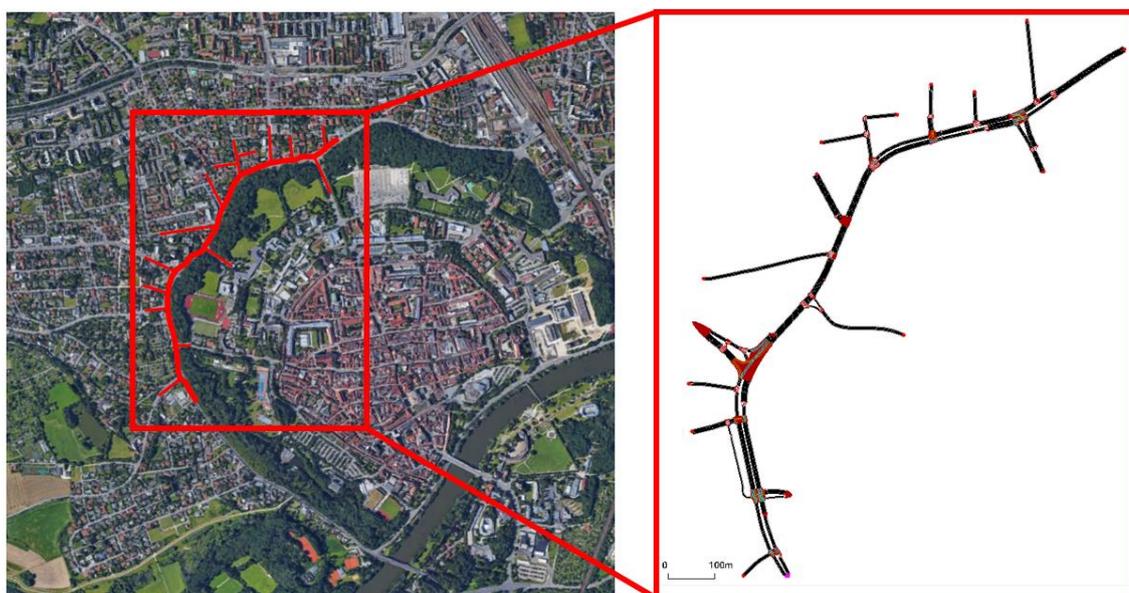


Abbildung 13: Streckenzug IG

- **Streckenzug Typ 4 – „München“ (MUC):** Dieser radiale Streckenzug auf der kernstadtnahen Leopold- bzw. Ludwigsstraße repräsentiert ebenso einen Typus mit hoher Kapazität, ähnlich zu Streckenzug 3. Jedoch sind die Kapazitäten hier nochmals höher, da bis zu vier Fahrstreifen pro Richtung existieren. Zudem werden hier neben dem MIV auch öffentliche Verkehrsmittel in Form von Bussen und Straßenbahnen als auch der Radverkehr betrachtet. Die daraus entstehenden Interaktionen, vor allem an den signalgeregelten Knotenpunkten, führen zu einer hohen Komplexität des Verkehrsablaufs. Solche Streckenzüge befinden sich hauptsächlich in Großstädten, sie stellen dort das Rückgrat der netzweiten multimodalen Kapazität dar. Der Streckenzug wird als angebaute Hauptverkehrsstraße mit mittlerer bis hoher Erschließungsintensität klassifiziert.

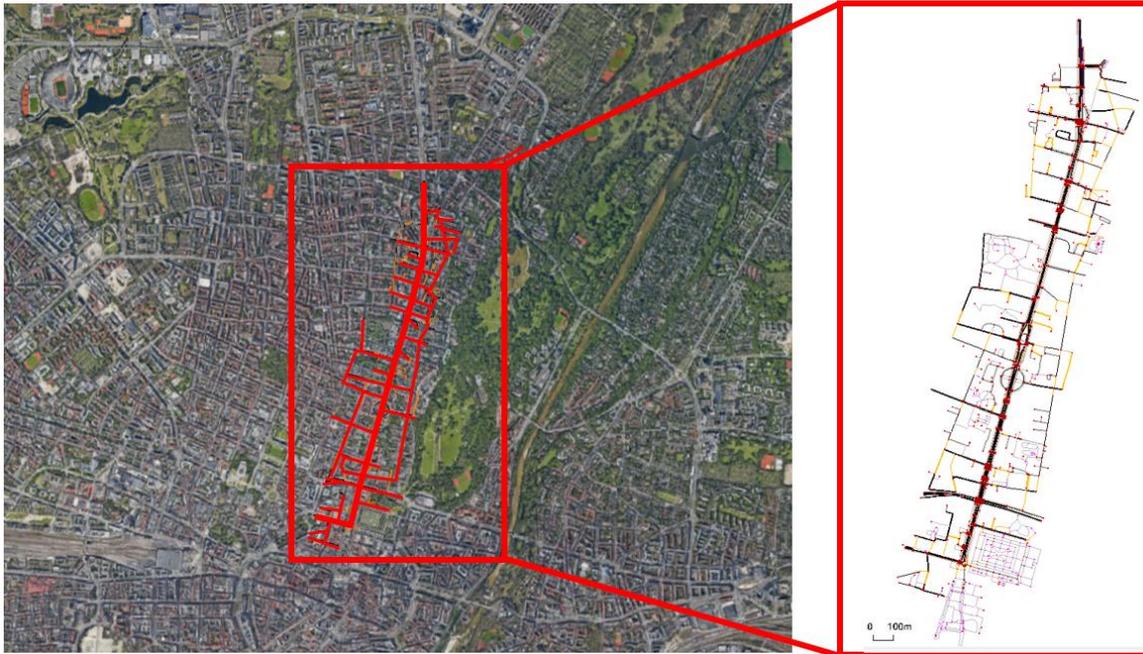


Abbildung 14: Streckenzug MUC

Diese vier Streckenzüge bilden die Komplexität städtischer Straßennetze in Deutschland gut ab. In Tabelle 5 werden die einzelnen Infrastrukturelemente in den jeweiligen Streckenzügen übersichtlich zusammengefasst. Dabei wird auf die Anzahl und die Signalisierung der Knotenpunkte, die Anzahl der Fahrstreifen, sowie das Vorhandensein von ÖPNV und Fahrradverkehr eingegangen. Zusätzlich werden in Tabelle 6 und Tabelle 7 die vorhandenen Knotenpunktformen und Knotenpunkzufahrtstypen entsprechend den Ergebnissen aus UR:BAN aufgezeigt. Dabei ist zu beachten, dass die Differenz der Summe der dargestellten Formen und Typen zu 100 % auf nicht kategorisierbare Formen und Typen fällt. Die Tabellen bestätigen nochmal abschließend, dass die Auswahl der Streckenzüge sowohl die häufigsten Infrastrukturelemente beinhaltet als auch die wichtige Rolle hochkapazitiver Streckenzüge für die Netzkapazität berücksichtigt.

Tabelle 5: Infrastrukturelemente in Streckenzügen

Infrastrukturelement	IK	IM	IG	MUC
Knotenpunkte	10	9	13	19
Vierarmige Knotenpunkte	2	5	0	5
Dreiarmlige Knotenpunkte	8	4	13	14
Fahrstreifen (Strecke)	1	1-2	1-3	1-4
Fahrstreifen (Knotenbereich)	2	3	4	4
Signalisierte Knotenpunkte	1	3	7	10
Nicht-signalisierte Knotenpunkte	7	6	6	9

Infrastrukturelement	IK	IM	IG	MUC
Höchstgeschwindigkeiten	50	50	50	50
ÖPNV	Nein	Nein	Nein	Ja
Fahrradverkehr	Nein	Nein	Nein	Ja

Tabelle 6: Knotenpunkttypen in Streckenzügen

Knotenpunkttyp	Häufigkeit [%]	IK	IM	IG	MUC
E1	15,1	X			
E2	1,8				
E3	11,2	X	X	X	X
E4	0,5				
E5	<0,1				
E6	2,3		(X)		
K1	27,3	X	X		
K2	1,7		X		
K3	14,4	X	X		X
K4	0,9				
K5	3,7				
K6	<0,1				

Tabelle 7: Anschlusstypen in Streckenzügen

Anschlusstyp	Häufigkeit	IK	IM	IG	MUC
A11	22,8	X	X		X
A22	15,7				X
A21	5,2			X	
A23	5	X		X	X
A33	4,6	X	X		X
A212	4,2		X	X	X

## 4.4. Simulationsmodelle

### 4.4.1. Simulationssoftware

In einer Simulation werden viele Modelle miteinander gekoppelt, um die dahinterliegenden, komplexen Systeme beschreiben zu können. Mikroskopische Verkehrssimulationen vereinen dabei speziell Fahrzeugfolgemodelle, Fahrstreifenwechselmodelle und Routenwahlmodelle, um das Verkehrsgeschehen zu beschreiben. Zudem wird die Infrastruktur mittels eines Netzmodells abgebildet, auch Verkehrssteuerungsalgorithmen können implementiert werden.

Zur mikroskopischen Simulation werden in Deutschland in der Regel drei Softwareumgebungen verwendet: VISSIM, AIMSUN und SUMO. Während für VISSIM schon einige

Modelle (Krause et al., 2017; Olstam et al., 2020; Zeidler et al., 2018) für automatisiertes Fahren existieren, besteht das Münchner Straßennetz nur in AIMSUN. Aus wissenschaftlich-theoretischer Perspektive interessante Verkehrssteuerungsalgorithmen, wie im Projekt FLOW angewendet, liegen anwendungsbereit für SUMO vor. Letzteres bietet zudem die Freiheit, beliebige Modelle implementieren zu können.

Die gewählte Software für die verkehrstechnischen Berechnungen ist SUMO, welches vom DLR entwickelt wurde und kontinuierlich erweitert wird. Die Auswahl liegt darin begründet, dass SUMO

1. eine hohe Flexibilität in der Auswahl der Modelle des Fahrverhaltens liefert,
2. es international weitverbreitet zu Forschungszwecken angewandt wird und daher eine Vielzahl an OpenSource-Projekten zur Funktionserweiterung zur Verfügung stehen
3. und lehrstuhlintern Zugriff auf mehrere kalibrierte und hochqualitative Netze besteht, u. a. die in Abschnitt 4.3.2 ausgewählten und für die Forschungsaufgabe gut geeigneten Streckenzüge.

Die zu evaluierenden Streckenzüge können einerseits einfach aus den bestehenden Netzen entnommen werden und auf Grund der Flexibilität von SUMO können andererseits Verhaltensmodelle für automatisierte Fahrzeuge aus weiteren verfügbaren Forschungsprojekten implementiert werden, obwohl diese nicht explizit für SUMO entwickelt wurden. Diese Aspekte machen die Verwendung von SUMO vorteilhaft im Vergleich zu VISSIM und AIMSUN, da jene keinen Einblick in die explizite Modellierung des Fahrverhaltens erlauben, und zudem in der Forschung weniger verbreitet sind.

#### **4.4.2. Eingangsdaten**

Die Simulationseingangsdaten lassen sich grob in drei Kategorien unterteilen, welche im Folgenden beschrieben werden: Verkehrsinfrastruktur, Verkehrsnachfrage und die Modelle des Fahrverhaltens.

##### **4.4.2.1. Verkehrsinfrastruktur**

Die Verkehrsinfrastruktur umfasste neben dem Straßennetz zusätzlich die Verkehrssteuerungsanlagen sowie etwaige multimodale Angebote. Die in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen ausgewählten Streckenzüge wurden aus bestehenden Simulationsnetzen entnommen. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Qualität entsprechend hoch ist und

die Straßensegmente sowie Knotenpunktgeometrien ausreichend genau abgebildet sind. Dies wurde zusätzlich noch anhand von Satellitenbildern überprüft.

Die Lichtsignalsteuerung wird gemäß dem HBS als Festzeitsteuerung abgebildet. Für die in Ingolstadt verorteten Streckenzügen wurden hierfür auf Basis der realen LSA-Schaltdaten durch Mittelwertbildung der Freigabezeiten stündliche Signalpläne entworfen und implementiert (Harth, Langer, & Bogenberger, 2021). Ebenso wurde für den Streckenzug in München eine Festzeitsteuerung basierend auf den realen Signalplänen implementiert (Grigoropoulos et al., 2021).

Zusätzlich wurden existierende Einrichtungen für Radfahrer abgebildet, sodass auch diese Verkehrsteilnehmer in der Simulation entsprechend berücksichtigt werden können. Des Weiteren sind Bushaltestellen sowie ein an die existierenden Linienverkehre angelehnter Fahrplan im Münchener Streckenzug implementiert. Dies erlaubt die vorhandene multimodale Verkehrsnachfrage in der Simulation abzubilden und etwaige Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern zu einem gewissen Grad abzubilden.

#### 4.4.2.2. Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage umfasst sowohl räumliche als auch zeitliche Aspekte. D.h., es muss spezifiziert werden, welche Quelle und welches Ziel jeder Verkehrsteilnehmer hat und wann die jeweilige Reise begonnen wird. Dies wird im Regelfall in sogenannten zeitabhängigen Quelle-Zielmatrizen zusammengefasst, wobei Quellen und Ziele als Zonen aufgefasst werden.

Die Verkehrsnachfrage für die Netze IK und IM wird dem SAve-Projekt (SAve Consortium, 2021) entnommen, die verwendeten Simulationsmodelle sind frei verfügbar<sup>1</sup>. Dort wurden solche Quelle-Ziel Matrizen für einen regulären Werktag kalibriert (Harth et al., 2021). Die Nachfrage für den Fall IG wurde im Projekt InTAS ermittelt und steht ebenfalls frei für Forschungszwecke zur Verfügung (Lobo, Neumeier, Fernandez, & Facchi, 2020). Die Verkehrsnachfrage für den Fall MUC wurde im Zuge der Förderprojekte RASCH (Keler et al., 2018) ermittelt und kalibriert (Grigoropoulos et al., 2021). Als Basisnachfrage wird in allen vier Szenarien eine Spitzenstunde gewählt. Diese wird dann für alle Fälle sukzessive verändert, sodass sowohl niedrige Verkehrsnachfragen untersucht werden, aber auch die Kapazität des jeweiligen Streckenzugs erreicht wird.

---

<sup>1</sup> URL: [https://github.com/TUM-VT/sumo\\_ingolstadt](https://github.com/TUM-VT/sumo_ingolstadt)

Dieses Vorgehen ermöglicht es, die wichtigsten Charakteristika der Streckenzüge zu ermitteln. Diese beinhalteten das Fundamentaldiagramm (FD), die Sättigungsverkehrsstärke und die durchschnittliche Rückstaulänge. Anhand des FD lassen sich dann neben der Verkehrsbelastung weitere Kennwerte ableiten, wie die Kapazität oder die durchschnittliche Geschwindigkeit für Verkehrszustände im Streckenzug.

#### 4.4.2.3. Modellierung des Fahrverhaltens

Die Grundlagen zur Modellierung des Fahrverhaltens wurden in Kapitel 3 zusammengetragen und ausführlich beschrieben. Dort wurde insbesondere auf die im europäischen Forschungsprojekt CoEXist (CoEXist Consortium, 2020) entwickelten Modelle hingewiesen.

Diese Modelle wurden nun in SUMO implementiert und können somit in der Szenariosimulation verwendet werden. Dadurch kann die Flexibilität von SUMO beibehalten werden, aber zugleich sichergestellt werden, dass neueste Forschungsergebnisse in die Simulation einfließen. Im Speziellen werden die zwei Modellvarianten *All-knowing* und *Normal* verwendet, welche laut (Olstam et al., 2020) einer fortgeschrittenen Automatisierung für die Straßentypen Hauptverkehrs- und Stadtstraße entsprechen, d.h. SAE-Level 4 für die meisten Infrastrukturtypen. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass geringere Automatisierungsgrade im städtischen Bereich aufgrund sicherheitsrelevanter Aspekte nicht eingesetzt werden. Das Modell *All-knowing* beschreibt den höchsten Automatisierungsgrad und ist vor allem für die Zukunftsszenarien *Innovativ* und *Visionär* relevant. Das Modell *Normal* beschreibt einen Automatisierungsgrad, bei welchem die Fahrzeuge etwas konservativer als menschliche Fahrer agieren. Dieses Modell ist für die Zukunftsszenarien *Konservativ* und *Innovativ* geeignet. Die Parameterspezifikationen sind in Kapitel 3 dargelegt.

Als Fahrstreifenwechselmodell wird der Standard von SUMO eingesetzt (Erdmann, 2015), allerdings mit Parameterwerten, die empfohlen wurden, um das kooperative Verhalten von AVF abzubilden (Li & Wagner, 2019).

Die Parameterwerte zum kooperativen Fahrverhalten sollen die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen modellieren. Zusätzlich wird die Kommunikation zwischen Infrastruktur und Fahrzeugen modelliert, in dem den AVF des Typs *All-knowing* eine GLOSA-Schnittstelle zugewiesen wird (Green Light Optimal Speed Advisory). Somit wissen die mit GLOSA ausgestatteten Fahrzeuge über den Zustand der LSA Bescheid und können ihre Geschwindigkeiten entsprechend adaptieren.

Die Interaktion zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern ist vor allem in multimodalen Szenarien von Interesse. In diesem Forschungsprojekt wird angenommen, dass AVF in gleicher Art und Weise wie menschliche Fahrer mit Fahrradfahrenden und Zufußgehenden interagieren. Genauere Modellierungsansätze sind derzeit noch in Entwicklung und nur für sehr spezifische Fragestellungen anwendbar.

### 4.4.3. Szenariomodellierung

In Abschnitt 3.5 wurden die Zukunftsszenarien inhaltlich beschrieben. In den nachfolgenden Abschnitten wird der Fokus daher auf deren Umsetzung in Simulationsmodellen gesetzt.

#### 4.4.3.1. Basisszenario

Im Basisszenario wird die aktuell vorherrschende Situation auf den Straßen städtischer Netze modelliert. Deshalb werden in diesem Szenario keine AVF sondern lediglich konventionelle, von Menschen gesteuerte Fahrzeuge modelliert. In SUMO wird daher auf die Standardmodelle zurückgegriffen. Das Standardmodell für das Fahrzeugfolgeverhalten ist jenes von (Krauss, 1998), welches ähnlich zum Gipps-Modell aus der Überlegung entstanden ist, dass Unfälle durch das Halten von ausreichenden Abständen vermieden werden sollen. Das Fahrstreifenwechselmodell ist jenes von (Erdmann, 2015).

Die Resultate der Simulationsstudie werden dazu verwendet, den im HBS und anderen Richtlinien vorkommenden Berechnungsmethoden Korrekturfaktoren zuzuweisen, welche die Auswirkungen von AVF berücksichtigen. Diese Korrekturfaktoren beziehen sich auf das Basisszenario als Referenz. Daher müssen die Ergebnisse der Modellierung des Fahrverhaltens konventioneller Fahrzeuge möglichst konform zu den genannten Richtlinien sein. Die entsprechenden Modelle werden also dahingehend angepasst. Dabei wird speziell das FD im HBS in den Fokus gerückt, da jenes ein makroskopisches Modell zur Beschreibung des kollektiven Fahrverhaltens ist. Erst durch diese Angleichung der Fahrverhaltensparameter in SUMO an die FDs im HBS kann eine sinnhafte Ableitung von Korrekturfaktoren in den weiteren Szenarien erfolgen. Dieser Modellanpassungsvorgang sowie die entsprechenden Ergebnisse sind in Abschnitt 4.7 beschrieben.

#### 4.4.3.2. Konservatives Szenario

In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass 33 % aller Fahrzeuge bereits automatisiert verkehren. Für die AVF wird das Modell *Normal* nach (Olstam et al., 2020) verwendet, da angenommen wird, dass das höchste Automatisierungslevel noch nicht

vollständig erreicht werden. Zusätzlich nehmen wir an, dass keine aktive Beeinflussung der AVF durch eine zentrale Steuerungseinheit aktiv ist. Das bedeutet, Kapazitätssteigerungen werden lediglich aus dem Fahrverhalten der AVF entstehen.

#### 4.4.3.3. Innovatives Szenario

Das innovative Szenario stellt eine Zukunft des städtischen Verkehrs dar, in der insbesondere durch Politik und Verkehrsmanagementmaßnahmen die Automatisierung des Straßenverkehrs vorangetrieben wird. Die Durchdringung AVF in der Fahrzeugflotte ist größer als im zuvor beschriebenen konservativen Szenario und wird als 66 % angenommen. Des Weiteren wird angenommen, dass die Hälfte der AVF mit dem Modell *Normal* und die andere Hälfte mit dem Modell *All-knowing* abgebildet werden kann.

Zusätzlich wird der Einsatz von gesonderten Fahrstreifen für AVFs als eine Verkehrsmanagementmaßnahme untersucht. Einige Forschungspapiere haben den Einsatz solcher gesonderten Fahrstreifen bereits auf Autobahnen mittels theoretischer Überlegungen oder in Simulationsstudien untersucht. Ihr Nutzen im urbanen Raum ist noch wenig erforscht. Sofern auf den Straßen weiterhin größtenteils ein Mischverkehr aus automatisierten und konventionellen Fahrzeugen herrscht, müssen automatisierte Fahrfunktionen an das menschliche Fahren angepasst sein und können daher ihre Potenziale hinsichtlich der Effizienzsteigerung von Straßen zugunsten der Sicherheit evtl. nicht voll ausschöpfen. Daraus ergibt sich die Überlegung automatisierte Fahrzeuge getrennt von Konventionellen zu führen und somit beispielsweise geringere Fahrzeugfolgeabstände zu ermöglichen.

Zur Veranschaulichung der Sonderfahrstreifen wird in Abbildung 15 eine Kreuzung des Streckenzugs IG mit Sonderfahrstreifen dargestellt. Die schwarz eingefärbten Fahrstreifen sind sowohl für konventionelle Fahrzeuge als auch automatisierte Fahrzeuge befahrbar, welche als graue bzw. rote Dreiecke dargestellt sind. Die dunkelgrau eingefärbten Fahrstreifen sind lediglich für AVF befahrbar.

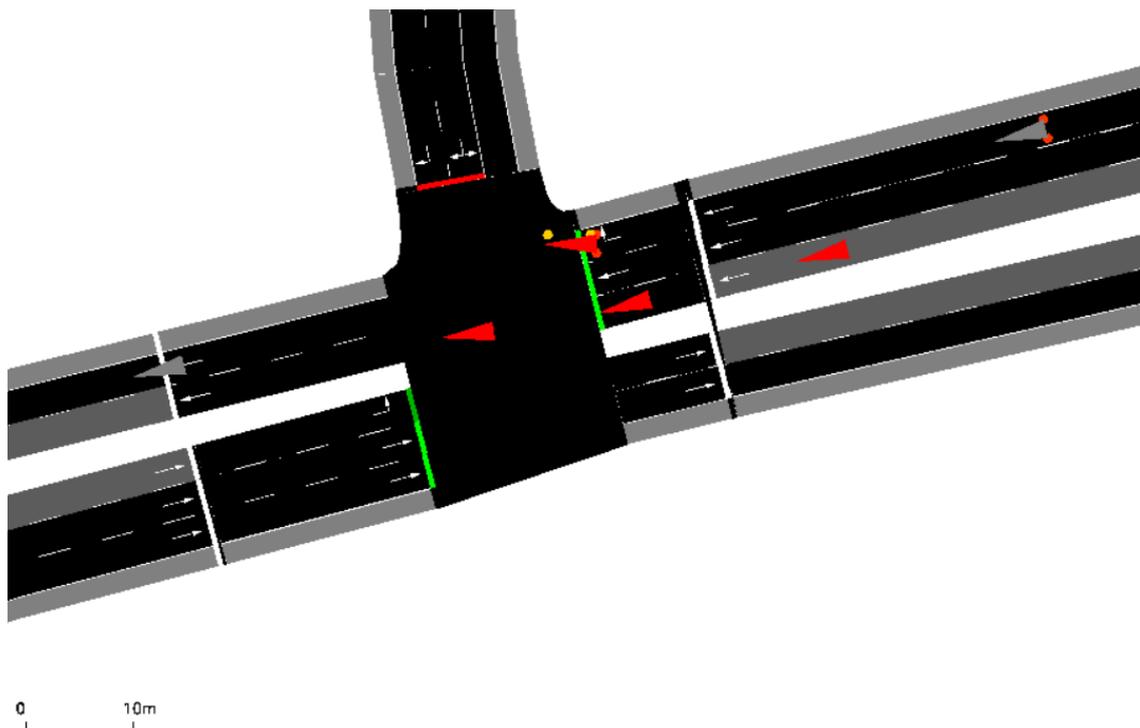


Abbildung 15: Beispiel für eine Situation mit Sonderfahrstreifen für AVF

Für das innovative Szenario wurde daher die Wirkung eines Sonderfahrstreifens für AVF im städtischen Umfeld untersucht. Um diese Forschungslücke systematisch zu untersuchen, werden die Sonderfahrstreifen zuerst für einzelne Kreuzungen analysiert. Hierbei wurde ein Abschnitt zwischen Knotenpunkten betrachtet, auf denen unter verschiedenen Rahmenbedingungen getestet wurde, welchen Einfluss ein solcher Fahrstreifen auf die Kapazität der Straßeninfrastruktur hat. Sowohl die Verkehrsnachfrage als auch der Durchdringungsgrad von automatisierten Fahrzeugen und die Charakteristika des Sonderfahrstreifens selbst wurden in unterschiedlichen Szenarien variiert und in der Simulation umgesetzt.

Im Anschluss werden die daraus gewonnenen Erkenntnisse für den Einsatz der Maßnahme auf der Streckenzugsebene verwertet. Dies ist in den folgenden Abschnitten näher erklärt.

#### 4.4.3.3.1. Untersuchung einzelner Kreuzungen

Zuerst werden einzelne Kreuzungen untersucht. Die simulierte Basistopologie besteht aus einer mindestens zweistreifigen Zufahrt zu einem vierarmigen Knotenpunkt. Auf dieser Zufahrtsstrecke wird in den verschiedenen Szenarien der Sonderfahrstreifen implementiert. In den verschiedenen Szenarien wird die Infrastruktur im Hinblick auf die Anzahl der Fahrstreifen der Zufahrt, die Anzahl der Fahrstreifen am Knotenpunkt und die Länge der Zufahrtsstrecke variiert. Der betrachtete Leistungsindikator ist die Kapazität

der Knotenpunktzufahrt. Sie wird als maximale Verkehrsstärke in einem Intervall aggregiert über 6 Minuten definiert und an der Haltelinie gemessen. Die Intervalldauer ist somit ein Vielfaches der Umlaufzeit von 90 Sekunden, was eine korrekte Aggregation der Verkehrsflüsse ermöglicht. Es werden die zuvor in Abschnitt 4.4.2.3 erwähnten Modelle des Fahrverhaltens der automatisierten Fahrzeuge verwendet. Die Durchdringungsgrade werden zwischen 0 % und 100 % in 25 %-Schritten variiert und jeweils eine sinnvolle Kombination der zwei AVF-Fahrverhalten gewählt. Dies ergibt 11 verschiedene Nachfrageszenarien, wie in Tabelle 8 dargestellt ist.

Tabelle 8: Nachfrageszenarien für das innovative Szenario auf Kreuzungsebene

Nachfrageszenario	Durchdringungsgrad	Anteil <i>Normal</i>	Anteil <i>All-knowing</i>
1	0	-	-
2	25	100	0
3	25	50	50
4	25	0	100
5	50	100	0
6	50	50	50
7	50	0	100
8	75	100	0
9	75	50	50
10	75	0	100
11	100	0	100

Die Nachfrage wird außerdem abhängig von der Infrastruktur im Hinblick auf die Abbiegeströme variiert. Für Szenarien mit eigenem Abbiegefahrstreifen werden 15 % Abbieger angenommen, bei Nichtvorhandensein von separaten Abbiegestreifen wird von 5 % Abbiegern ausgegangen. Linksabbieger werden nur dann berücksichtigt, wenn diese einen separaten Fahrstreifen haben. Zusätzlich wurden Szenarien untersucht, in denen der öffentliche Verkehr berücksichtigt wird. Hierbei wird der Sonderfahrstreifen sowohl für Busse als auch für AVF verwendet. Der Fahrzeugfolgeabstand der Busse (Fahrplankontakt) beträgt in den betrachteten Varianten 2,5 sowie 10 Minuten. Außerdem wird eine Haltestelle in Form eines Buskaps auf der betrachteten Strecke angefahren. Werden in einem Szenario Busse berücksichtigt, so ist der Sonderfahrstreifen stets der Rechtste. In weiteren Szenarien werden auch andere Fahrstreifen als Sonderfahrstreifen für AVF gewidmet, allerdings nie mehr als ein Fahrstreifen.

Die Verkehrssteuerung hat einen großen Einfluss auf die Kapazität eines Knotenpunktes. Sowohl eine Festzeitsteuerung als auch eine verkehrsadaptive Steuerung werden in verschiedenen Szenarien in der Simulation implementiert. Bei der Festzeitsteuerung

werden Freigabe- und Sperrzeiten auf 33 Sekunden der 90sekündigen Umlaufzeit festgelegt. Dies entspricht einer realistischen Festlegung für eine vierarmige Kreuzung mit gleichverteilter Verkehrsnachfrage. Separat signalisierte Linksabbieger haben zusätzlich eine Freigabezeit von 6 Sekunden. Die Rahmenbedingungen der verkehrsadaptiven Steuerung sind die minimalen und maximalen Freigabezeiten, die auf 5 bzw. 50 Sekunden festgelegt wurden.

Als Verkehrsmanagementmaßnahme wird außerdem die Implementierung eines Vorsignals getestet. Das Vorsignal zielt darauf ab, die automatisierten Fahrzeuge, die sich auf dem Sonderfahrstreifen befinden, während der Rotphase des Hauptsignals in die Zone vor dem Hauptsignal einfahren zu lassen und sich auf die Fahrstreifen entsprechend der geplanten Route einzusortieren. Auf Grund der Positionierung vor den konventionellen restlichen Fahrzeugen könnten die Vorteile der effizienteren Beschleunigung der automatisierten Fahrzeuge im Sinne der Kapazitätssteigerung der Infrastruktur genutzt werden. Außerdem soll durch das Vorsignal erreicht werden, dass Fahrstreifenwechsel zum Erreichen der Zielfahrstreifen sicher durchgeführt werden können.

Schließlich sollen auch die Effekte von Geschwindigkeitsbeschränkungen untersucht werden. Da es sich um städtische Netze handelt, werden Geschwindigkeitsbeschränkungen von 30 und 50 km/h betrachtet. Ein Szenario soll untersuchen, welchen Effekt es hat, wenn die Geschwindigkeit des Sonderfahrstreifens auf 50 und das der regulären Fahrstreifen auf 30 km/h begrenzt ist. Hintergrund für eine solche Maßnahme wäre eine Erzielung einer Verkehrsberuhigung und Erhöhung der Verkehrssicherheit bei gleichzeitiger Gewährleistung einer weiterhin annehmbaren Kapazität.

#### **4.4.3.3.2. Untersuchung der Streckenzüge**

Da im Streckenzug IK meist nur ein Richtungsfahrstreifen existiert, wird das innovative Szenario dort nicht untersucht. Für die Streckenzüge IM, IG und MUC wird der Einsatz von AVF-Sonderfahrstreifen untersucht. Jedoch können hierfür nicht alle möglichen Varianten aufgrund der sehr hohen Anzahl an möglichen Kombinationen untersucht werden. Daher wird lediglich ein Fall pro Streckenzug analysiert, der auf den Erkenntnissen basiert, welche aus der detaillierten Untersuchung aus der Kreuzungsperspektive gewonnen wurden. De Facto werden die Sonderfahrstreifen, wenn möglich, am linken Rand der Fahrbahn eingesetzt, es werden keine Vorsignale betrachtet und falls Busspuren vorhanden sind, wird den AVF das Fahren auf diesen Spuren erlaubt.

#### 4.4.3.4. Visionäres Szenario

Das letzte Szenario, das innerhalb des Projektes betrachtet wird, beschreibt eine Zukunft mit einer Vielzahl an AVF. Genauer genommen wird hier ein Durchdringungsgrad von 95 % angenommen. Zusätzlich wird für die Simulation davon ausgegangen, dass alle AVF mit dem Modell *All-knowing* abgebildet werden können. Einzelne Fahrzeuge werden vermutlich auch in ferner Zukunft noch durch Menschen gesteuert werden, was erklärt, warum nicht von einer reinen AVF-Flotte ausgegangen werden kann.

Im innovativen Szenario wurde eine die Strecken betreffende Maßnahme untersucht. Daher wird nun der Knotenpunkt als Kapazitätsgrenze anvisiert. Es werden weitgehende Anpassungen in der Steuerung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten vorgenommen. Im Speziellen werden derzeit noch stark beforschte Methoden des *Reinforcement Learning* (RL) eingesetzt, da die ersten Ergebnisse sehr vielversprechend sind (Ault & Sharon, 2021). Dabei lernt der Regler dank neuronaler Netze auf Basis von eingespeisten Daten wie er sich „optimal“ zu verhalten hat.

Konkret lernt im RL ein abstrakter Agent (z.B. ein AVF oder eine LSA-Steuerung) durch Interaktionen mit seiner Umgebung. Jene ist definiert durch den Zustandsraum, den Aktionsraum, eine Übergangsfunktion (um aus Zuständen Aktionen abzuleiten), eine Belohnungsfunktion, einen Beobachtungszeitraum sowie weitere Modellparameter. Der Agent zielt darauf ab, zu jedem Zeitpunkt seine erwartete Belohnung zu maximieren. Diese bezieht sich auf die restliche Zeit bis zum Ende des Beobachtungszeitraums. Die Belohnung hängt davon ab, wie Zustände bewertet werden. Die Zustände kann der Agent auf Basis der Übergangsfunktion durch Aktionen ändern. D.h., durch die Aktionen des Agenten kann die erwartete Belohnung maximiert werden.

Die Verkehrssteuerung ist ein klassisches Anwendungsgebiet dieses noch jungen Forschungsgebiets (z.B. (Ault & Sharon, 2021)). Dabei sind die Agenten meist Regler, die ein oder mehrere LSAs bedienen können. Der Zustandsraum und die Belohnungsfunktion beziehen sich auf Verkehrskennwerte, z.B. die Summe der Verzögerungen im System. Aktionen können beispielsweise das Schalten der nächsten Signalphase sein. Nach mehreren Durchläufen lernt der Regler den Zusammenhang zwischen seinen Aktionen und den Auswirkungen auf die Zustände. Konkreter formuliert wird der Regler zunehmend besser abschätzen können, welche Signalphasenschaltung zu einer möglichst geringen Verzögerung im System führen wird.

Inzwischen sind mehrere Studien erschienen, die verschiedene Agenten, Zustandsräume, Aktionsräume und Belohnungsfunktionen untersuchen. Viele davon basieren auf SUMO, was erneut die Flexibilität und Mächtigkeit dieser Software aufzeigt. Teils wurde der zugrundeliegende Programmcode dieser Studien mitveröffentlicht. Eine dieser Arbeiten von (Ault & Sharon, 2021) bietet eine breite Palette an verschiedenen Algorithmen sowie Szenarien. Daher wird auf diese Basis zurückgegriffen, um das visionäre Szenario zu evaluieren.

Im Speziellen wird nur der Streckenzug IG in diesem Szenario evaluiert, da hier entsprechend viele LSA vorhanden sind, aber sich der entsprechende Rechenaufwand innerhalb sinnvoller Grenzen befindet. Als Agent wird ein Regler definiert, der alle LSA im Streckenzug beeinflussen kann und benachbarte LSA dabei berücksichtigt. Als mögliche Aktion definieren wir das Schalten der nächsten Phase. Als Zustandsraum definieren wir die Verzögerungen der Fahrzeuge. Wir nehmen an, dass die Positions- und Geschwindigkeitsdaten aller Fahrzeuge aufgrund fortgeschrittener V2I – Kommunikation zugänglich sind. Das bedeutet, dass die RL-Algorithmen die Verzögerungen aller AVF und menschlich gesteuerten Fahrzeuge berücksichtigen, um die Steuerung zu optimieren. Der Regler hat zum Ziel, die Summe der Verzögerungen zu minimieren. Erneut evaluieren wir mehrere Nachfrageintensitäten, um das FD schätzen zu können und folglich durchschnittliche Geschwindigkeiten sowie Kapazitäten ableiten zu können.

#### **4.4.4. Streckenzugsbezogene Szenarioevaluation**

Aufgrund der topologischen Ausprägung der einzelnen Streckenzüge ist es nicht sinnvoll jedes Zukunftsszenario für jeden Streckenzug zu untersuchen. Dies betrifft insbesondere das innovative und das visionäre Szenario. Ersteres wird nur für die Streckenzüge IM, IG und MUC evaluiert, da auf dem kleinsten Streckenzug IK meist nur ein Fahrstreifen pro Richtung existiert. Daher würde in diesem Fall ein Sonderfahrstreifen für AVF einem Fahrverbot für konventionelle Fahrzeuge entsprechen. Eine solche Regelung hat für eine Straße mit einem Fahrstreifen pro Richtung keinen Sinn, da Verkehrsteilnehmer ihre entsprechenden an die Strecke angrenzenden Ziele nicht erreichen könnten. Das visionäre Szenario wird wie oben beschrieben nur für den Streckenzug IG evaluiert. Tabelle 9 bietet einen Überblick über alle Simulationsszenarien.

Tabelle 9: Überblick über die Simulation der Streckenzüge

Modellierungsaspekte	Basis	Konservativ	Innovativ	Visionär
Streckenzüge	IK, IM, IG, MUC	IK, IM, IG, MUC	IM, IG, MUC	IG
Durchdringungsgrad AVF [%]	0	33	66	95
Davon Modell <i>Normal</i> [%]	-	100	50	0
Davon Modell <i>All-knowing</i> [%]	-	0	50	100

## 4.5. Analysierte Indikatoren

### 4.5.1. Fundamentaldiagramm

Als Hauptindikator wird das FD gewählt, da von ihm sämtliche durchschnittlichen Verkehrszustände für verschiedene Nachfrageintensitäten abgelesen werden können. Aus ihm können durchschnittliche Geschwindigkeiten für verschiedenste Verkehrszustände als auch die Kapazität des Streckenzugs abgeleitet werden. Zudem können auch Aussagen über Stauereignisse getätigt werden.

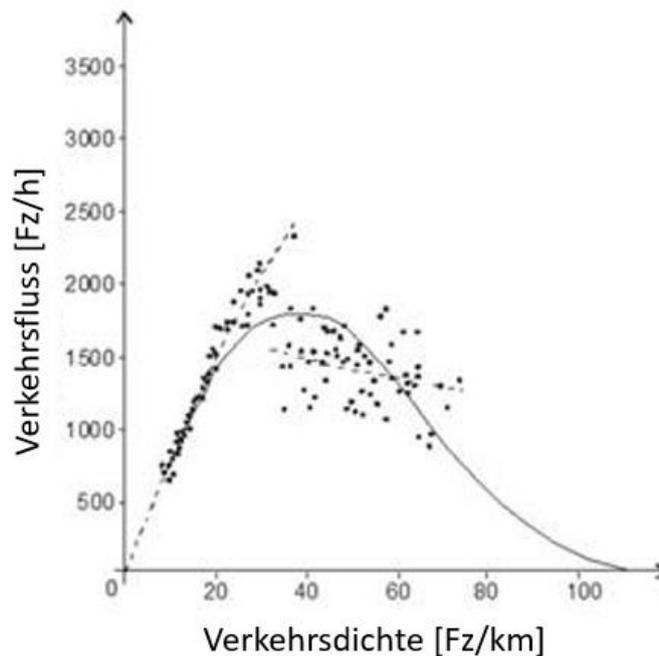


Abbildung 16: Fundamentaldiagramm (Koshi, Iwasaki, & Ohkura, 1981)

Abbildung 16 zeigt ein FD auf Basis 1-minütiger Mittelwerte des Verkehrsflusses und der Verkehrsdichte für einen Streckenabschnitt (Koshi et al., 1981). Generell ist es wie folgt

zu interpretieren. Auf der y-Achse wird der mittlere Verkehrsfluss bzw. die Verkehrsstärke  $Q$  [Fz/h] im Streckenzug dargestellt, auf der x-Achse die mittlere Verkehrsdichte  $K$  [Fz/km]. Eine Kurve in diesem Diagramm zeigt also wie sich der mittlere Verkehrsfluss abhängig von der Verkehrsdichte ändert. Bei geringen Nachfragen und daher geringen Verkehrsflüssen und Verkehrsdichten steigt die Dichte mit dem Verkehrsfluss. Das Maximum liegt in dem Bereich, in dem die Kapazität erreicht wird. D.h., trotz steigender Nachfrage stagnieren die Verkehrsflüsse, Warteschlangen wachsen und Stau entsteht. Das wird durch eine steigende Verkehrsdichte repräsentiert. Steigt die Nachfrage weiter oder werden weitere Engpässe im System aktiviert, sinkt der Verkehrsfluss wobei die Verkehrsdichte steigt.

Es ist zu betonen, dass traditionell Zählraten von Schleifendetektoren für die Berechnung von Verkehrsflüssen und Dichten verwendet werden. D.h., das FD bezieht sich normalerweise auf einen Querschnitt. In den letzten zwei Jahrzehnten wurde in der Forschung jedoch das FD basierend auf Daten von mehreren Detektoren untersucht (Daganzo, 2007; Geroliminis & Daganzo, 2008). Damit bezieht es sich nicht mehr auf einen einzelnen Querschnitt, sondern kann die Verkehrslage für ein ganzes Netz darstellen. Die MFD und FD-Berechnung ist jedoch nicht nur auf Schleifendetektordaten beschränkt. Gerade auf Basis von Simulationsdaten kann das FD berechnet werden, welches sich auf den gesamten simulierten Raum bezieht. Diese Vorgehensweise wird für die unten dargestellten Diagramme angewandt. Dies hat den Vorteil, dass implizit auch die Effekte von LSAs berücksichtigt werden.

#### **4.5.2. Sättigungsverkehrsstärken**

Zusätzlich werden die Sättigungsverkehrsstärken an einem bestimmten Querschnitt in jedem Streckenzug gemessen. Jene ist als maximal mögliche Verkehrsstärke eines Fahrzeugstroms während der Freigabezeit einer Lichtsignalanlage definiert. Um sie zu messen, ist eine maximale Verkehrsnachfrage notwendig. Diese wird auf Basis des FDs identifiziert. Bei dieser Verkehrsnachfrage werden dann am ausgewählten Querschnitt die Verkehrsstärken während der Grünphase über vier Umläufe gemessen. Die Sättigungsverkehrsstärke wird als Durchschnitt der gemessenen Werte bestimmt.

#### **4.5.3. Rückstaulänge**

Als weitere Kennzahl wird die durchschnittliche Rückstaulänge gemessen. Dazu werden wieder Verkehrszustände betrachtet, welche zur höchsten Verkehrsstärke führen. Dann

wird die Länge des Rückstaus auf jedem Fahrstreifen im Streckenzug gemessen und anschließend der Durchschnitt gebildet.

#### 4.5.4. Ergebnisdaten in SUMO

SUMO ermöglicht es, die über die Zeit gemittelte Verkehrsdichte und das harmonische Mittel der Geschwindigkeit für einzelne Streckensegmente ausgeben zu lassen. Die Verkehrsstärke lässt sich nur an Querschnitten berechnen. D.h., die Sättigungsverkehrsstärken können direkt an den entsprechenden Querschnitten anhand der SUMO-Ausgabedaten gemessen werden. Für die Fundamentaldiagramme ist jedoch erforderlich, die Verkehrsflüsse auch über die räumliche Ausprägung zu mitteln. Daher wird die fundamentale Verkehrsgleichung,

$$q = k v$$

ausgewertet, da sowohl die Verkehrsdichte  $k$  und die Geschwindigkeit  $v$  auswertbar sind. Dies entspricht dann einer Mittelung über die gesamte räumliche Ausdehnung, da  $k$  und  $v$  entsprechend gemessen werden. Die Rückstaulängen können direkt ohne Zwischenberechnung aus SUMO extrahiert werden.

### 4.6. Berechnung der Korrekturfaktoren

Auf Basis der Simulationen können Aussagen zu einer Vielzahl an Parametern getätigt werden. Am interessantesten ist wie bereits erwähnt das FD, da es (i) im HBS eine Eingangsgröße für die Dimensionierung ist, (ii) Auskunft über die Verkehrszustände über verschiedene Nachfrageintensitäten gibt, und (iii) die Kapazität sowie das Ausmaß von Stau leicht abzulesen sind. Daher wird der Berechnungsvorgang der Korrekturfaktoren im Folgenden anhand des FDs beschrieben. Der Vorgang lässt sich analog auf die Sättigungsverkehrsstärken und Rückstaulängen anwenden.

Das FD wird berechnet, indem für einzelne Intervalle die mittlere Verkehrsstärke und Verkehrsdichte bestimmt wird. Diese Mittelwerte werden dann im  $(Q, K)$ -Raum dargestellt. Freiflussverkehrszustände sind durch niedrige Verkehrsflüsse und geringe Verkehrsdichten charakterisiert. Die Kapazität ist durch maximale Verkehrsflüsse und mittlere Dichten bestimmt. Niedrige Verkehrsflüsse und hohe Verkehrsdichten lassen auf lange Warteschlangen an den Kreuzungen und daher auf ein hohes Stauaufkommen rückschließen.

Das FD entsteht durch eine Punktwolke einzelner Messungen. Um einen Korrekturfaktor in Abhängigkeit der Dichte berechnen zu können, müssen die entsprechenden FDs mittels Interpolation verstetigt werden. Dazu wird eine abschnittsweise lineare Interpolation angewandt. Die zwei resultierenden kontinuierlichen Kurven lassen sich dann ohne weiteres vergleichen. Im Speziellen wird der Korrekturfaktor  $f_{Korr}(K)$  als Verhältnis der Verkehrsflüsse des Basisszenarios  $Q_B(K)$  und des Vergleichsszenarios  $Q_{Sz}(K)$  bei einer gegebenen Dichte ermittelt.

$$f_{Korr}(K) = \frac{Q_{Sz}(K)}{Q_B(K)}$$

## 4.7. Modellanpassung an das HBS

Die Kalibrierung einer Simulation beschreibt den Prozess, bestimmte Parameter der beinhalteten Modelle zu eichen, sodass ein System wie gewünscht abgebildet werden kann (FGSV, 2006a). Im Normalfall wird die Realität angenähert, welche durch empirische Daten widerspiegelt wird. Im Falle dieses Projekts sollen jedoch Korrekturfaktoren für das HBS berechnet werden. Daher werden die Fahrzeugfolgeparameter des entsprechenden Modells in SUMO an die FDs im HBS angeglichen, da das FD das Verkehrsverhalten im HBS widerspiegelt. Es wird daher von einer „Modellanpassung“ und nicht von einer Kalibrierung gesprochen, um hervorzuheben, dass die Simulationsmodelle nicht die Realität, sondern das Fahrverhalten entsprechend dem HBS abbilden.

Prinzipiell ist das FD im HBS abhängig von der Straßenkategorie entsprechend der RIN definiert. Im Folgenden wird der Anpassungsprozess beispielhaft anhand der Kategorie „angebaute Hauptverkehrsstraße mit mittlerer bis hoher Erschließungsintensität“ gezeigt, da jener die meisten Straßenabschnitte in den ausgewählten Streckenzügen zugeordnet werden können. Die Ergebnisse der Modellanpassung für die Kategorien „anbaufreie Hauptverkehrsstraße“ sowie „angebaute Hauptverkehrsstraße mit niedriger Erschließungsintensität“ sind im Anhang 9.1 in Tabelle 14 bis Tabelle 16 sowie in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt.

Konkret wird ein 1 km langer Straßenabschnitt modelliert und es werden kurzzeitig auftretende Kapazitätseinschränkungen erzeugt, um Parkvorgänge und Bushaltevorgänge zu simulieren. So kann die im HBS aufgeführte Erschließungsintensität berücksichtigt werden. Dann werden verschiedene Nachfragestärken definiert, für welche die Simulationläufe durchgeführt werden sollen.

Das Simulationsmodell wird in eine Optimierungsumgebung integriert. Die Entscheidungsvariablen sind Fahrzeugfolgeparameter des Standard-Fahrzeugfolgemodells in SUMO, welche sich auf den örtlichen und zeitlichen Mindestabstand der Fahrzeuge, die Stochastizität in der Fahrweise und die gewünschten Geschwindigkeiten beziehen.

Die Zielgröße ist die mittlere quadrierte Abweichung zwischen dem Resultat aus der Simulation, sowie dem entsprechenden Wert im HBS. Diese Zielgröße soll minimiert werden. Als Optimierungsumgebung wird eine sog. simulationsbasierte Optimierung ausgewählt. Diese ruft effektiv die Simulation auf und ändert die Entscheidungsvariablen innerhalb definierter Intervalle dahingehend, dass die Zielgröße innerhalb der maximalen Iterationsschritte bestmöglich erreicht wird. Mehr Details zu diesem Vorgehen wurden bereits präsentiert (Amini, Ambühl, Tilg, Bogenberger, & Menendez, 2020).

Abbildung 17 zeigt die Modellanpassungsergebnisse. Auf der y-Achse wird die durchschnittliche Geschwindigkeit angegeben, auf der x-Achse der mittlere Verkehrsfluss. Die blauen Punkte zeigen die HBS-Werte und die orangenen Punkte entsprechen den Simulationsergebnissen des Basisszenarios. Die Wurzel der mittleren quadrierten Abweichung (engl. *RMSE*) liegt bei 1,56 km/h. Aus der Abbildung kann entnommen werden, dass die höchste Abweichung bei der niedrigsten evaluierten Verkehrsstärke entsteht. Diese entspricht ca. 5,5 %, was entsprechend (FGSV, 2006a) auf ein ausreichend genau angepasstes Modell hinweist.

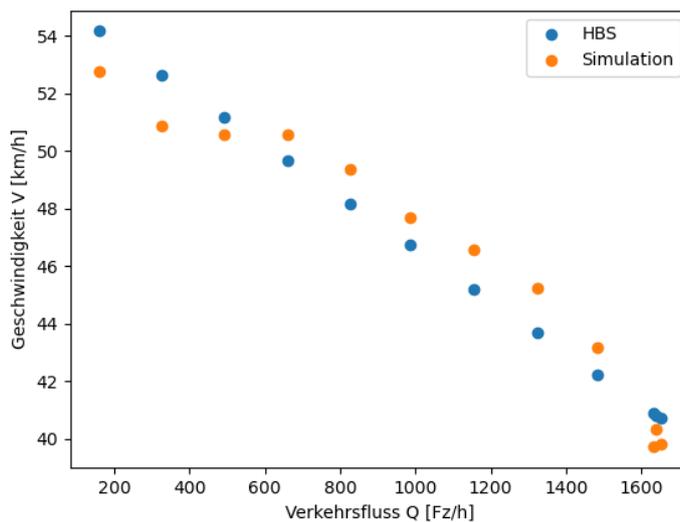


Abbildung 17: Ergebnisse der Anpassung des Simulationsmodells an das HBS (Straßenkategorie: Angebaute Hauptverkehrsstraße mit mittlerer bis hoher Erschließungsintensität)

## 4.8. Berechnungsergebnisse

Im Folgenden werden die Berechnungsergebnisse nach Szenarien aufgeteilt dargestellt und erläutert. Zuerst werden dabei die aus den Simulationsergebnissen abgeleiteten FDs dargestellt. Im zweiten Schritt werden die berechneten Korrekturfaktoren aufgezeigt. Dabei wird nicht explizit auf das Basisszenario eingegangen, da sich aus jenem lediglich eine Referenzgröße zur Berechnung des Korrekturfaktors ableiten lässt.

Zusätzlich ist zu erwähnen, dass jedes Simulationsszenario mit 20 verschiedenen Zufallszahlen berechnet und anschließend ein Durchschnitt gebildet wurde. Es wurde eine maximale zulässige statistische Abweichung von 10 % für jedes Auswertungsergebnis angesetzt, welche innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % erreicht werden muss. Dieses Kriterium wird mit 20 Simulationsläufen nach der Berechnungsmethodik nach (FGSV, 2006a) für alle vorliegenden Szenarien erfüllt.

### 4.8.1. Konservatives Szenario

Für das konservative Szenario werden die Ergebnisse für das Fundamentaldiagramm und die entsprechenden Korrekturfaktoren für den Streckenzug IK exemplarisch im Speziellen vorgestellt. Die Interpretation ist konsistent auf alle anderen Streckenzüge übertragbar, wie in den entsprechenden Abbildungen im Anhang 9.2 und 9.3 erkannt werden kann. Die Sättigungsverkehrsstärken und Rückstaulängen werden für alle Streckenzüge gezeigt.

#### 4.8.1.1. Fundamentaldiagramm

Das FD für den Streckenzug IK wird für das Basisszenario die blaue Kurve und für das konservative Szenario die orange Kurve in Abbildung 18 dargestellt.

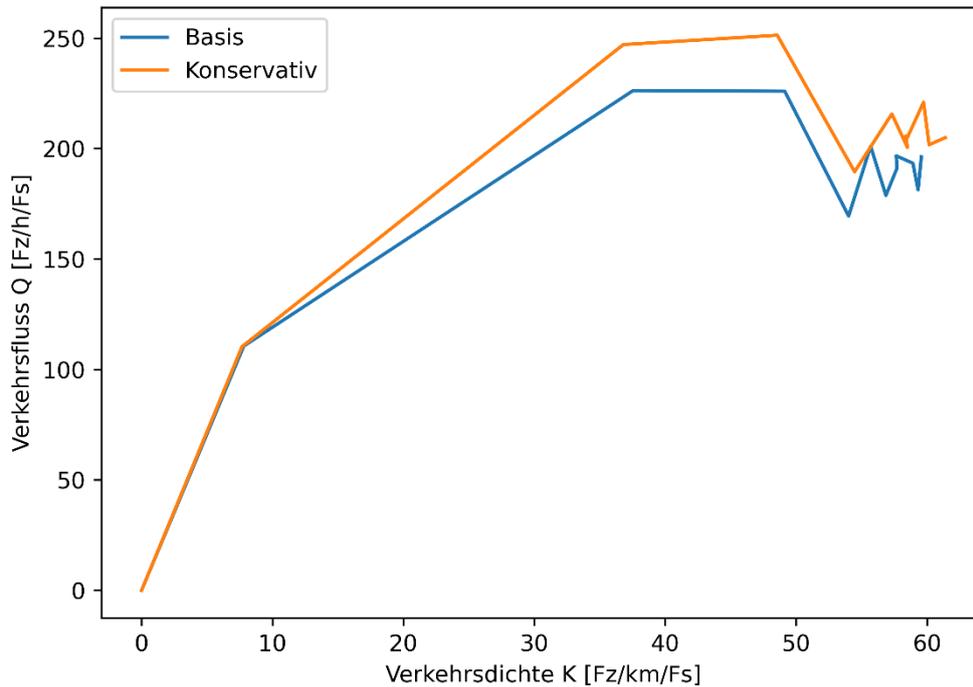


Abbildung 18: Fundamentaldiagramm für das konservative Szenario und den Streckenzug IK

Aus der Abbildung lassen sich folgende Begebenheiten schlussfolgern:

- Bei niedrigen Nachfragewerten überlappen sich die beiden Kurven nahezu und es sind keine Effekte der 33 % automatisierten Fahrzeuge (alle im AVF-Modus *Normal*) im Verkehrsfluss auf die resultierenden Verkehrszustände zu erkennen.
- Im Bereich der Kapazität finden sich jedoch substanzielle Unterschiede von ca. 25 Fz/h zwischen den zwei Kurven. Hier ist der positive Einfluss der AVF auf den Verkehrsfluss klar ersichtlich.
- Im gebundenen Bereich scheinen die gemessenen Verkehrsstärken stärker zu fluktuieren. Dies spiegelt die Instabilität der entsprechenden Verkehrszustände wieder. Zudem sind die Einflüsse der AVF hier deutlich verringert.

Insgesamt ist der positive Einfluss der Automatisierung im Bereich der Kapazität signifikant gegeben. Dies ist ein erwartetes Ergebnis, da die AVF mit geringeren Zeitlücken fahren. Allerdings scheint die konstantere Fahrweise in diesem Szenario wenig Auswirkung auf die Varianz der gestauten Verkehrszustände zu haben, wie der unstete Kurvenverlauf zeigt. Das allgemeine Verkehrsgeschehen bei hohen Verkehrsdichten scheint somit immer noch sehr stochastisch zu sein.

### 4.8.1.2. Korrekturfaktor zum Fundamentaldiagramm

Auf Basis dieser FD lassen sich nun Korrekturfaktoren berechnen (siehe Abschnitt 4.6). Der Korrekturfaktor ergibt sich aus dem Vergleich der Verkehrsflüsse bei einer bestimmten Verkehrsdichte.

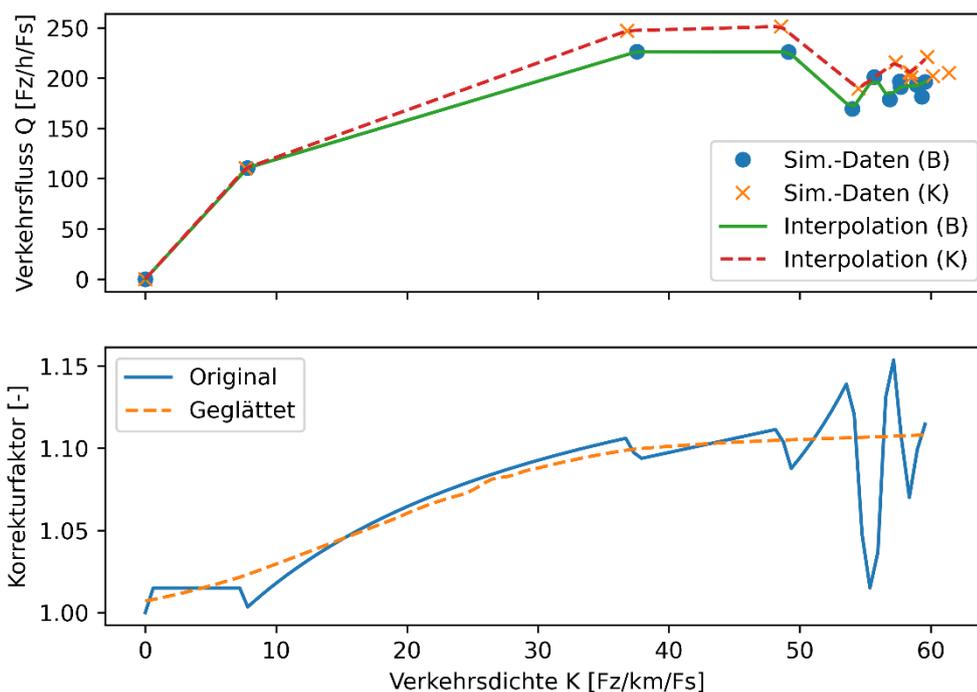


Abbildung 19: Korrekturfaktor für das konservative Szenario und den Streckenzug IK

Wie in Abbildung 19 ersichtlich, variiert der Korrekturfaktor über die Verkehrsdichte gesehen. Gegeben der vorhandenen Stochastizität, die aus den zufallsverteilten Fahrzeugankünften im System, den unterschiedlich gewählten Geschwindigkeiten und Konflikten an unregelmäßigen Kreuzungen resultiert, ist dies nicht weiter verwunderlich. Generell scheint der Korrekturfaktor für höhere Dichten zu steigen. Das bedeutet, dass besonders während hohem Verkehrsaufkommen die Vorteile der AVF zum Tragen kommen. Des Weiteren spiegelt das den Anstieg der Kapazität wider.

### 4.8.1.3. Sättigungsverkehrsstärke

Wie in Abschnitt 4.5.2 beschrieben, wurden die Sättigungsverkehrsstärken für hohe Verkehrsnachfragen an einem bestimmten Querschnitt pro Streckenzug ausgewählt. Tabelle 10 stellt die Ergebnisse für alle Streckenzüge dar. Dabei ist zu erkennen, dass die Korrekturfaktoren für drei der vier Streckenzüge steigen. Nur beim Streckenzug MUC ist

eine Verringerung zu verzeichnen. Dies liegt vermutlich daran, dass in diesem Streckenzug die komplexeste Netztopologie vorherrscht und multimodale Interaktionen berücksichtigt wurden. Allgemein können bei einer Auswertung eines einzelnen Querschnitts die Einflüsse wie Signalsteuerung, Interaktion mehrerer Knotenpunkte, Abbiegeströme, etc. nicht ausgeschlossen werden. Diese Effekte können dazu führen, dass die Sättigungsverkehrsstärke nur schwer messbar ist. Eine vertiefte Analyse der Sättigungsverkehrsstärke muss sich daher auf eine einzelne, isolierte Kreuzung beziehen. Eine entsprechende Untersuchung wird in Anhang 9.4 für den zentralen, lichtsignalgesteuerten Knotenpunkt des Streckenzugs IK und verschiedene Durchdringungsgrade dargestellt.

Tabelle 10: Sättigungsverkehrsstärken für das konservative Szenario

<b>Streckenzug</b>	<b>Szenario</b>	<b>Sättigungsverkehrsstärke [Fz/h]</b>	<b>Korrekturfaktor [-]</b>
IK	Basis	1637	1,00
IK	Konservativ	1734	1,06
IM	Basis	2133	1,00
IM	Konservativ	2223	1,04
IG	Basis	501	1,00
IG	Konservativ	535	1,07
MUC	Basis	1155	1,00
MUC	Konservativ	1104	0,96

#### 4.8.1.4. Rückstaulänge

Zusätzlich wurde die durchschnittliche Rückstaulänge bei einer hohen Verkehrsnachfrage ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 dargestellt. Generell verringern sich die Rückstaulängen in allen Streckenzügen. Die absoluten Werte sind jedoch sehr gering. Es wird vermutet, dass Einflüsse der Verkehrsnachfrage, der lokalen Netztopologie, sowie der Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern auf die Rückstaulängen im Netz größer sind als der Durchdringungsgrad von AVF.

Tabelle 11: Rückstaulängen für das konservative Szenario

<b>Streckenzug</b>	<b>Szenario</b>	<b>Rückstaulänge [m]</b>	<b>Korrekturfaktor [-]</b>
IK	Basis	35	1,00

Streckenzug	Szenario	Rückstaulänge [m]	Korrekturfaktor [-]
IK	Konservativ	35	0,99
IM	Basis	24	1,00
IM	Konservativ	24	0,96
IG	Basis	22	1,00
IG	Konservativ	19	0,88
MUC	Basis	19	1,00
MUC	Konservativ	18	0,96

## 4.8.2. Innovatives Szenario

Im innovativen Szenario wurde ein hierarchisches Vorgehen gewählt, um die Effekte von Sonderfahrstreifen zuerst variantenreich und allgemein für einen einzelnen Knotenpunkt zu untersuchen, und dann am Beispiel der Streckenzüge einen spezifischen Einsatz dieser Maßnahme zu evaluieren.

### 4.8.2.1. Einzelne Knotenpunkte

Um die Effekte des Sonderfahrstreifens und der Änderungen in den einzelnen Szenarien zu bewerten, wird zunächst ein Referenzszenario untersucht, in dem solche Fahrstreifen nicht vorhanden sind. Dann wird ein "naiver Fall" des Einsatzes von Sonderfahrstreifen für AVF betrachtet, gefolgt vom "naiven Fall Plus". Daraufhin werden die Effekte der Knotenpunktzufahrt und LSA-Steuerung, der Interaktion mit öffentlichem Verkehr, des Vorhandenseins eines Vorsignals, sowie von Geschwindigkeitsbeschränkungen untersucht. Abschließend wird ein Zwischenfazit gezogen.

#### 4.8.2.1.1. Referenzfall

Der Referenzfall erlaubt die Identifizierung der Wirkungen, welche rein auf das Vorhandensein von automatisierten Fahrzeugen zurückzuführen sind. Die Knotenpunktzufahrt ist zweistreifig mit zusätzlichen separaten Abbiegefahrstreifen. Der Durchdringungsgrad der automatisierten Fahrzeuge wird von Nachfrageszenario 1 zu Nachfrageszenario 11 schrittweise erhöht. Es zeigt sich, dass die Kapazität des Knotenpunktes durch das Fahrverhalten der automatisierten Fahrzeuge bei einer 100 % Durchdringung um 30 % gesteigert werden kann. Die Ergebnisse der fahrstreifenbezogenen Kapazität (y-Achse)

sind in Abbildung 20 für alle Nachfrageszenarien, siehe Abschnitt 4.4.3.3.1, auf der x-Achse mit einem Kreissymbol dargestellt.

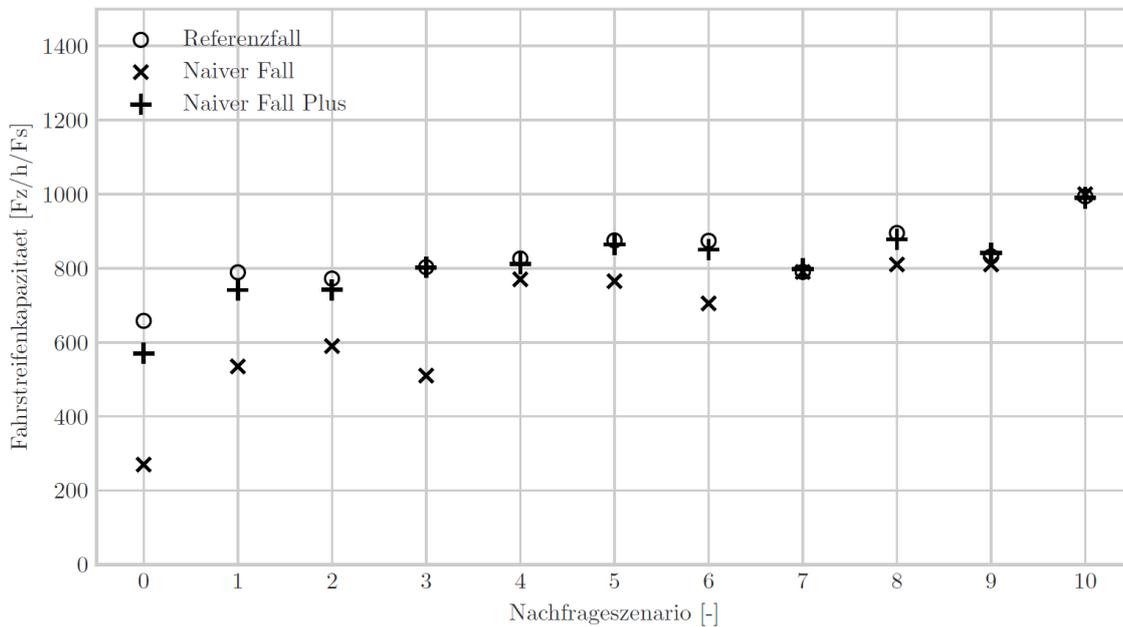


Abbildung 20: Vergleich von Referenzfall, naivem und naivem Fall Plus

#### 4.8.2.1.2. Naiver Fall und naiver Fall Plus

Im nächsten Schritt wird eine vereinfachte Variante des Sonderfahrstreifens in das Szenario implementiert, welchen wir als „naiven Fall“ betiteln. Der rechte Fahrstreifen wird dabei auf der gesamten Länge bis zur Haltelinie nur für automatisierte Fahrzeuge freigegeben. Daraus ergibt sich für alle Nachfrageszenarien eine Reduktion der gemessenen maximalen Verkehrsstärke bis auf jenes mit 100 % automatisierten Fahrzeugen. Letztes ist identisch zum zuvor vorgestellten Szenario ohne Sonderfahrstreifen, da in dem Fall alle vorhandenen Fahrzeuge zwischen den Fahrstreifen wählen dürfen. Bei niedrigen Durchdringungsgraden von automatisierten Fahrzeugen können allerdings nur wenige Fahrzeuge den Fahrstreifen verwenden. In diesen Fällen ist die Reduktion der maximalen Verkehrsstärke besonders hoch (siehe Abbildung 20), da an den Knotenpunkten viele Konflikte entstehen, die den Verkehrsfluss negativ beeinflussen.

Die vereinfachte Implementierung des Sonderfahrstreifens wird in einem nächsten Szenario erweitert, welches wir als „naiver Fall Plus“ bezeichnen. Durch das frühere Ende des Sonderfahrstreifens wird ermöglicht, dass Fahrzeuge sichere Fahrstreifenwechsel vor dem Knotenpunkt durchführen können, z.B. um auf Abbiegefahrstreifen zu gelangen. In den Ergebnissen zeigt sich, dass die Kapazität durch diese Möglichkeit wieder das Niveau des Basisszenarios erreicht (siehe Abbildung 20). Daraus lässt sich schließen,

dass Sonderfahrstreifen eine geeignete Maßnahme darstellen können, wenn automatisierte Fahrzeuge priorisiert oder von konventionellen Fahrzeugen getrennt werden sollen, ohne damit eine Reduktion der Kapazität herbeizuführen, und auf eine Lösung der Konflikte vor den Knotenpunkten geachtet wird. Diese ersten Auswertungen zeigen bereits, dass der Nutzen von Sonderfahrstreifen maßgeblich von deren Gestaltung und von anderen Rahmenbedingungen (z.B.: vorherrschende Verkehrsnachfrage) abhängt.

#### **4.8.2.1.3. Knotenpunktzufahrt und LSA-Steuerung**

Im Folgenden wird untersucht, welchen Einfluss verschiedene Topologien des Straßennetzes, die Verkehrssteuerung und das Vorhandensein von öffentlichen Verkehrsmitteln auf die Kapazität haben. In Abbildung 21 werden einige Ergebnisse zusammengefasst in Boxplots dargestellt. In allen dargestellten Szenarien ist das Linksabbiegen gestattet, die Lichtsignalanlage ist festzeitgesteuert und es verkehren öffentliche Buslinien. Alle weiteren topologischen Parameter werden in den einzelnen Szenarien variiert. Die verschiedenfarbigen Boxplots zeigen die Fälle, in denen kein Sonderfahrstreifen existiert (hellgrau) oder der Fahrstreifen am rechten (grau) oder linken (dunkelgrau) Rand der Fahrbahn als Sonderfahrstreifen eingerichtet ist. Die Boxplots illustrieren die Bandbreite der Ergebnisse der sich ergebenden Kapazitäten. Ein Trend, der aus den Ergebnissen abgeleitet werden kann, ist, dass es offenbar aus Perspektive der Kapazität vorteilhafter ist, keinen Sonderfahrstreifen einzurichten. Die hellgrauen Boxplots befinden sich in fast allen anderen Fällen über jenen mit Sonderfahrstreifen. Die geringsten Kapazitäten werden erreicht, wenn der Sonderfahrstreifen auf dem linken Fahrstreifen eingerichtet ist. Dies hat damit zu tun, dass Linksabbiegevorgänge allgemein konfliktreich sind, da Verkehrsströme mit entgegengesetzter Richtung durchgesetzt werden müssen. Wenn den Fahrzeugen stromaufwärts der Haltelinien nun Flexibilität für Einordnungsvorgänge genommen wird, z.B. durch einen Sonderfahrstreifen, kann dies zu verringerten Kapazitäten führen. Ist der Sonderfahrstreifen rechts eingerichtet, scheint der negative Effekt auf die Kapazität in den betrachteten Fällen geringer zu sein. Das weist erneut darauf hin, dass es von großer Bedeutung ist, den Sonderfahrstreifen entsprechend den lokalen Gegebenheiten einzurichten.

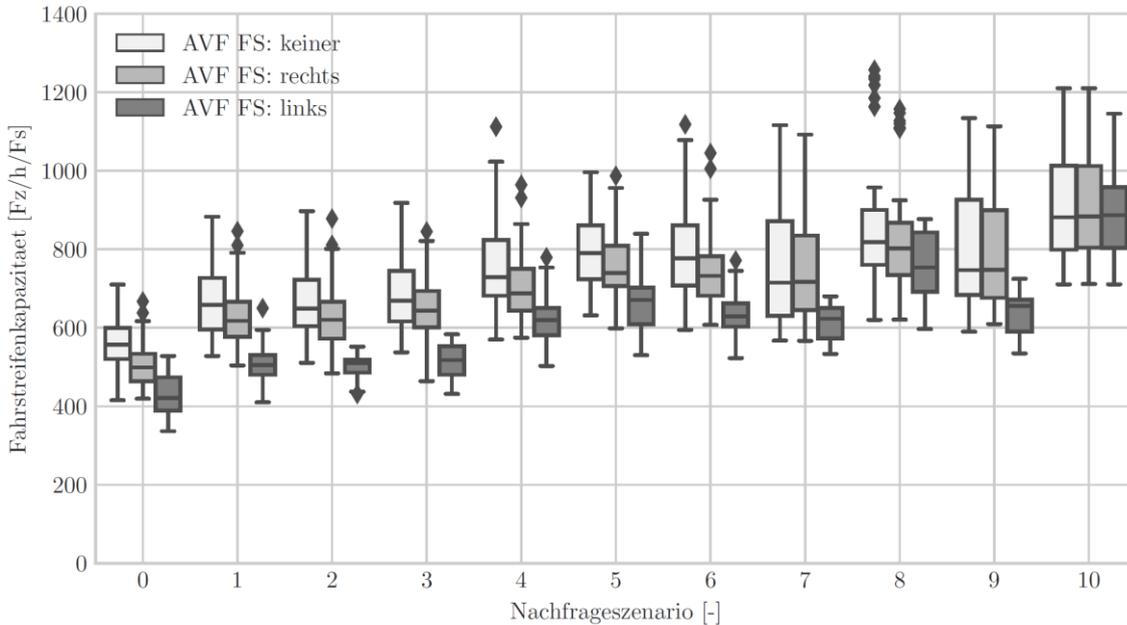


Abbildung 21: Auswirkungen der Kreuzungstopologie und Sonderfahrstreifen für AVF.

In weiteren Szenarien wurden auch die Einflüsse von Infrastrukturtopologien (in Anlehnung an die Anschlusstypen aus Abschnitt 4.3.1.2) und der Verkehrsnachfrage auf die Kapazität untersucht. Es lässt sich schließen, dass an Zufahrten mit drei Fahrstreifen, Festzeitsteuerung und Abbiegefahrstreifen nur für Rechtsabbieger am meisten von der Implementierung eines Sonderfahrstreifens profitiert werden kann. In diesen Fällen, kann die Kapazität durch einen Sonderfahrstreifen auf der linken Fahrbahnseite stets erhöht werden, auch wenn es sich nur um Steigerungen von bis zu 5 % handelt. Dieses Ergebnis steht im leichten Widerspruch zu jenen anderer Studien (Movaghar, Mesbah, & Habibian, 2020; Talebpour, Mahmassani, & Elfar, 2017; Vander Laan & Sadabadi, 2017) und ist darauf zurückzuführen, dass urbane Umgebungen auf Basis von mikroskopischen Simulationen untersucht wurden. Die genannten Studien basieren oft auf makroskopischen Ansätzen und behandeln mehrheitlich Autobahnsegmente.

#### 4.8.2.1.4. Öffentlicher Verkehr

Als weitere Rahmenbedingung wurde untersucht, welchen Effekt die Nutzung von bereits vorhandenen Sonderfahrstreifen für öffentliche Verkehrsmittel hat. Die Ergebnisse dazu sind in Abbildung 22 dargestellt. Es wird deutlich, dass, wie erwartet, mit steigender Durchdringung der automatisierten Fahrzeuge die mittlere Kapazität der Fahrstreifen besser ausgenutzt wird. Des Weiteren zeigt sich, dass schon bei niedrigen Durchdringungsgraden Anstiege der Kapazitäten verzeichnet werden können. Die Kapazitätswerte variieren jedoch in den einzelnen Nachfrageszenarien stark. Dies resultiert aus der Tatsache, dass auch Interaktionen zwischen Straßentopologien und der Betrieb des öffentlichen Verkehrs eine bedeutende Rolle für urbane Verkehrszustände spielen.

Sollte zum Beispiel der rechte Fahrstreifen für Busse reserviert sein, zugleich aber ein zusätzlicher Fahrstreifen für Rechtsabbieger aufgrund entsprechender Nachfrage existieren, kommt es zu gehäuften Konflikten und daher zu einer Reduktion der maximalen Verkehrsstärke. Natürlich muss im Falle einer solchen Freigabe die Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit des ÖPNV untersucht werden. Bei Bedarf kann eine solche Fahrstreifenfreigabe dank V2X-Kommunikation auch dynamisch gesteuert werden.

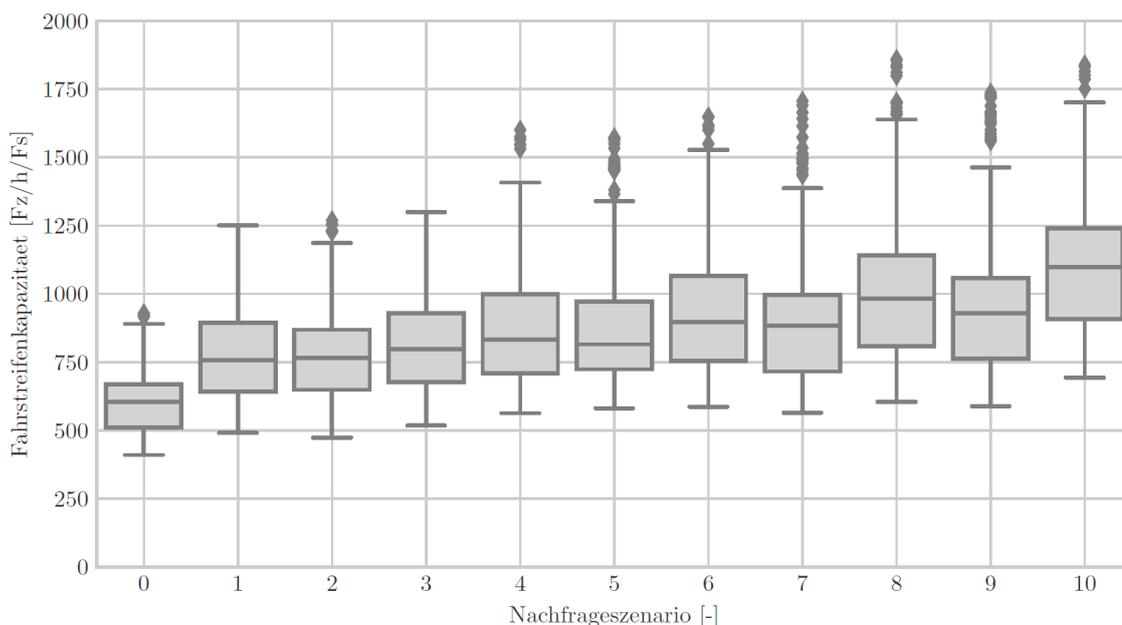


Abbildung 22: Auswirkungen der Öffnung einer vorhandenen Busspur für AVF.

#### 4.8.2.1.5. Vorsignal

Zusätzlich wurde die Wirkung eines Vorsignals auf die Kapazität untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 23 dargestellt. Das Vorsignal dient dazu, eine Schleuse für Fahrzeuge auf dem Sonderfahrstreifen zu erzeugen, um ein Vorsortieren zum Abbiegen zu ermöglichen. Die Fahrzeuge des Sonderfahrstreifens werden dabei während der Rotphase des Hauptsignals in die Zone vor diesem eingelassen und damit am Knotenpunkt vor den anderen Fahrzeugen priorisiert. Die Abbiegebeziehungen haben also einen großen Einfluss auf den Nutzen einer solchen Schleuse. In der Ergebnisdarstellung wird unterschieden, ob das Linksabbiegen generell erlaubt oder nicht erlaubt ist und ob es separate Abbiegefahrstreifen gibt oder nicht. In allen betrachteten Szenarien wurde die Kapazität durch das Vorsignal reduziert, insbesondere dort, wo Linksabbiegen erlaubt ist. Dieses unerwartete Ergebnis kann darauf zurückzuführen sein, dass das Vorsignal letztlich einen weiteren Engpass im Verkehrsnetz darstellt (z.B. nicht genutzte Freigabezeiten bei temporär großen Zeitlücken auf der gerade freigegebenen Schlei-

senzufahrt.) Daher müsste an dieser Stelle genauer untersucht werden, wie die Eigenschaften der Schleuse (insbesondere in Bezug auf das Signalprogramm und die Gestaltung der Vorsortierungsfläche) gestaltet sein sollten, damit die Vorteile einer solchen Maßnahme, die vor allem für die Sicherheit bei Fahrstreifenwechseln erwartet werden, optimal genutzt werden können, ohne dabei die Leistungsfähigkeit des Knotenpunktes zu reduzieren. Dies hängt jedoch von den lokalen Begebenheiten am jeweiligen Knotenpunkt ab und wird daher nicht näher untersucht.

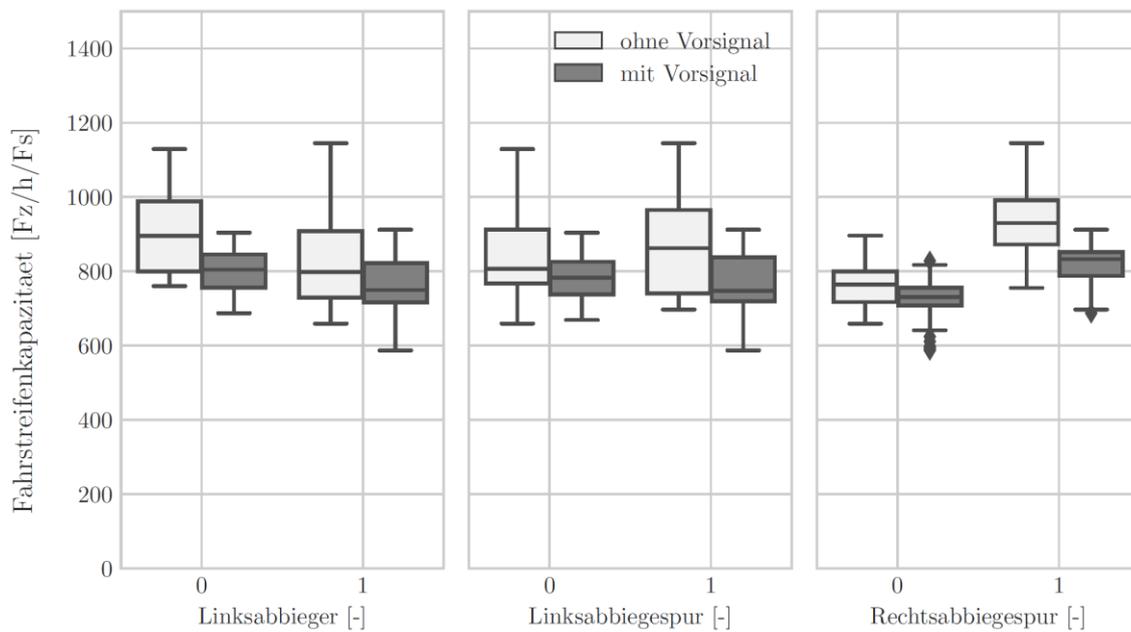


Abbildung 23: Auswirkungen eines Vorsignals auf die Kapazität.

#### 4.8.2.1.6. Geschwindigkeitsbeschränkungen

Als letztes wurde der Einfluss von Geschwindigkeitsbeschränkungen untersucht. Hierfür wurden Szenarien mit drei Fahrstreifen, Festzeitsteuerung und ohne aktives Vorsignal betrachtet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 24 dargestellt. Auf der x-Achse ist zu erkennen, ob ein Sonderfahrstreifen vorhanden ist und wenn ja, auf welchem Fahrstreifen dieser implementiert ist. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass die Kapazitäten bei Geschwindigkeitsbeschränkungen von 30 km/h stets geringer sind als bei 50 km/h. Weiterhin scheint die veränderte Geschwindigkeitsbeschränkung lediglich auf dem Sonderfahrstreifen keinen Einfluss auf die Kapazität zu haben. Diese Erkenntnis überrascht zunächst, da in diesem Fall die Heterogenität des Verkehrsflusses weiter verstärkt wird. Allerdings kann das eine interessante Maßnahme sein, wenn automatisierte Fahrzeuge priorisiert werden sollen (beispielsweise, wenn sie umweltfreundlicher und sicherer sind oder einen höheren Besetzungsgrad als konventionelle Fahrzeuge haben) ohne Leistungsfähigkeit im Straßennetz zu verlieren.

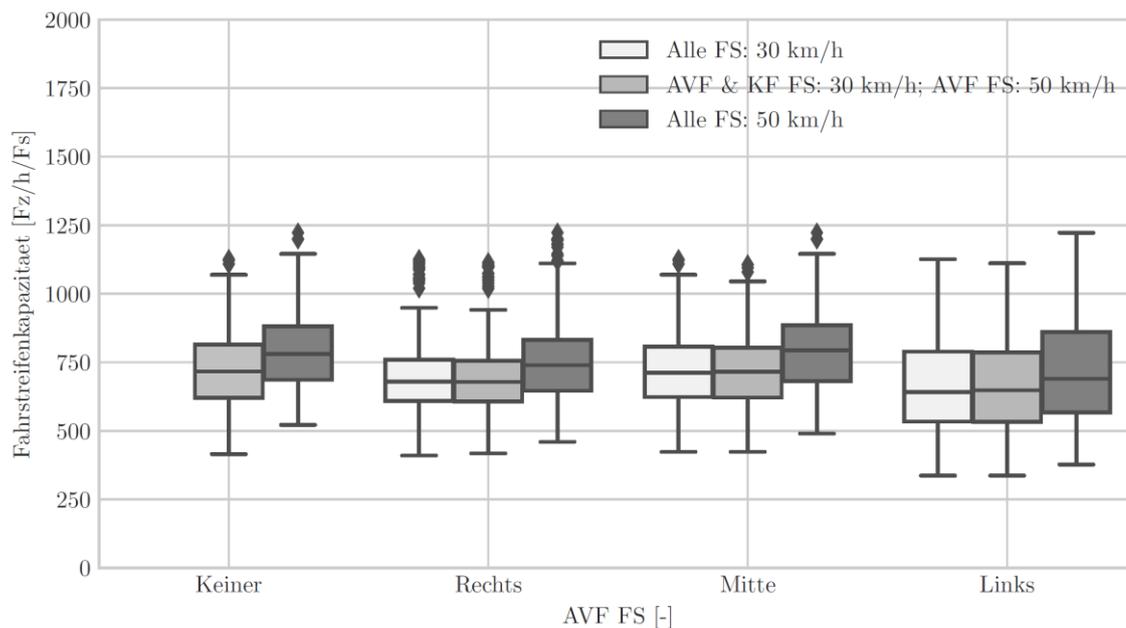


Abbildung 24: Auswirkungen einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf die Kapazität.

#### 4.8.2.1.7. Zwischenfazit zum Einsatz von Sonderfahrstreifen auf der Knotenpunktebene

Im Gesamten lässt sich aus den Ergebnissen schlussfolgern, dass die Wirkung von Sonderfahrstreifen für AVF in Bezug auf die Kapazität von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängt. Bei einer geringen Durchdringung von automatisierten Fahrzeugen in der Flotte kann ein solcher Fahrstreifen die richtungsbezogene Kapazität teils stark reduzieren und es ist eher empfehlenswert ggf. bereits vorhandene Sonderfahrstreifen auch für AVF freizugeben, um die Kapazität der Infrastruktur zu steigern und automatisierte Fahrzeuge zu fördern. Bei einer Durchdringung von 50 % lassen sich in etlichen Szenarien Kapazitätssteigerungen durch den Sonderfahrstreifen erkennen. In vielen Fällen zeigte der Sonderfahrstreifen jedoch keine großen Wirkungen bezüglich der Kapazität. Dennoch kann deren Einsatz sinnvoll sein, sollten positive Wirkungen hinsichtlich der Verkehrssicherheit aufgrund der Trennung von konventionellen und automatisierten Fahrzeugen erwartet werden. Des Weiteren können Sonderfahrstreifen positive Wirkungen zeigen, falls automatisierte Fahrzeuge priorisiert werden sollten. Dies könnte beispielsweise der Fall sein, wenn AVF als Ridepooling-Shuttle als Ergänzung zum öffentlichen Personennahverkehr fungieren und einen hohen Besetzungsgrad aufweisen.

#### 4.8.2.2. Streckenzüge

Ähnlich wie beim konservativen Szenario werden zuerst die FD und die zugehörigen Korrekturfaktoren betrachtet. Wir analysieren hier im Spezifischen den Streckenzug IG, da hier die Effekte am deutlichsten sind und sich daher anschaulich interpretieren lassen.

Für den Streckenzug IM scheint diese Maßnahme generell negative Effekte auf den Verkehrsfluss zu haben. Für den Streckenzug MUC ist der allgemeine Effekt gering, nur bei großen Verkehrsdichten scheinen Sonderfahrstreifen einen leicht negativen Effekt zu haben. Die Sättigungsverkehrsstärke und Rückstaulänge werden für alle Streckenzüge in den nachfolgenden Abschnitten gezeigt.

#### 4.8.2.2.1. Fundamentaldiagramm

Das FD wird in Abbildung 25 beispielhaft für den Streckenzug IG gezeigt. Die blaue Kurve zeigt den Verlauf der Verkehrszustände für das Basisszenario, die orange Kurve jenen für das innovative Szenario mit einer Durchdringung von 66 % AVF, davon je zur Hälfte im Fahrmodus *Normal* und *All-knowing* (siehe Abschnitt 4.4.3.2). Die grüne Kurve zeigt ein Vergleichsszenario, in welcher zwar der hohe Durchdringungsgrad von AVF angenommen wird, jedoch keine Sonderfahrstreifen implementiert werden. Die FD für die weiteren Streckenzüge sind im Anhang zu finden.

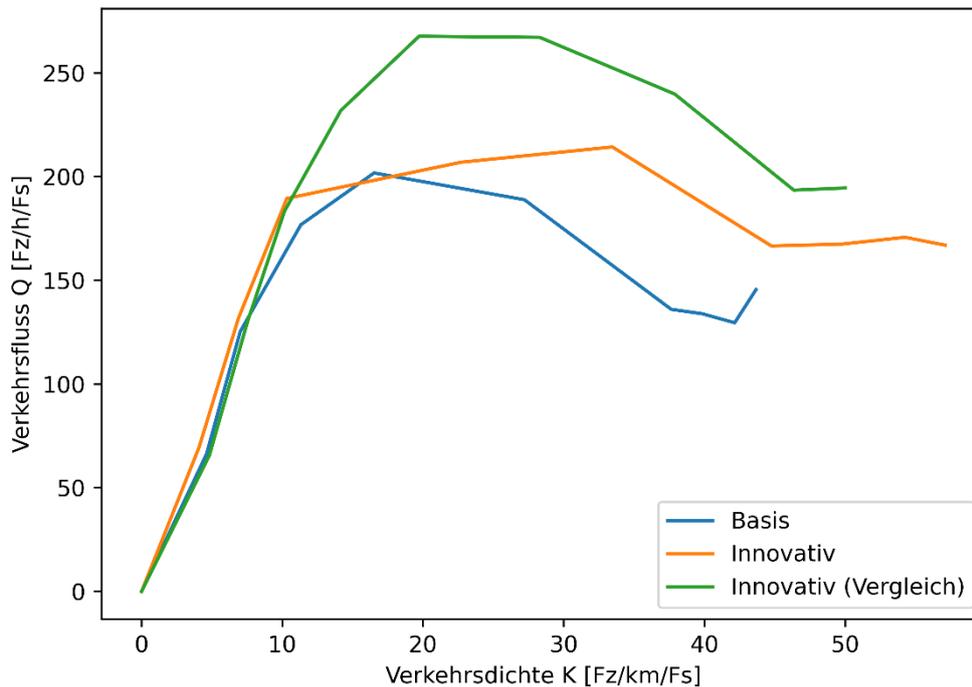


Abbildung 25: Fundamentaldiagramm für das innovative Szenario und den Streckenzug IG

Ähnlich zum konservativen Szenario lassen sich folgende Erkenntnisse aus der Interpretation der Abbildung gewinnen:

- Bei geringen Nachfragestärken sind die Verkehrszustände in beiden Szenarien sehr ähnlich. Das heißt, dass Sonderfahrstreifen für AVF auch bei einem hohen

Durchdringungsgrad von 66 % in diesen Situationen nur wenig Effekt auf den Verkehrsfluss haben.

- Ab einem Verkehrsfluss von ca. 200 Fz/h und einer Verkehrsdichte von ca. 15 Fz/km divergieren die beiden Kurven und ein Vorteil des innovativen Szenarios mit AVFs und Sonderfahrstreifen wird erkennbar. Der höhere Verkehrsfluss besteht sowohl bei höchster Kapazität als auch bei gestauten Verkehrszuständen.
- Es fällt jedoch auf, dass die Sonderfahrstreifen den Verkehrsfluss im Vergleich zum Fall ohne Sonderfahrstreifen (aber mit AVF) stark reduzieren. Daher müsste die Maßnahme im gegebenen Fall anderweitig (z.B. über die verbesserte Verkehrssicherheit) begründet werden.

Der hier präsentierte Fall IG zeigt, dass der Einsatz von AVF-Sonderfahrstreifen auf der Streckenzugesebene im Vergleich zum Basisszenario zu substanziell erhöhten Kapazitäten führen kann. Bei Betrachtung der Diagramme für die Fälle IM und MUC fällt jedoch auf, dass dies nicht notwendigerweise der Fall ist (siehe Anhang 9.2). Speziell im Fall IM wird die Kapazität sogar etwas reduziert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die mittlere Anzahl Fahrstreifen im Fall IM kleiner ist als in den anderen beiden Fällen. Durch die Widmung einer Fahrspur werden somit starke Restriktionen für den konventionellen Verkehr auferlegt, die offensichtlich dazu führen, dass für die untersuchten AVF-Durchdringungsgrade niedrigere Verkehrsflüsse als im Basisszenario zustande kommen. Im Fall MUC scheint der Einfluss des erhöhten Durchdringungsgrades auf die realisierten Verkehrsstärken im Allgemeinen gering zu sein. Dies lässt sich auf die hier betrachteten Interaktionen mit anderen Verkehrsmodi zurückzuführen, die offensichtlich maßgebend für die Kapazität des Streckenzugs sind.

#### **4.8.2.2.2. Korrekturfaktor zum Fundamentaldiagramm**

Im Folgenden wird der Korrekturfaktor dargestellt. Die Darstellung in Abbildung 26 gleicht jener für das konservative Szenario.

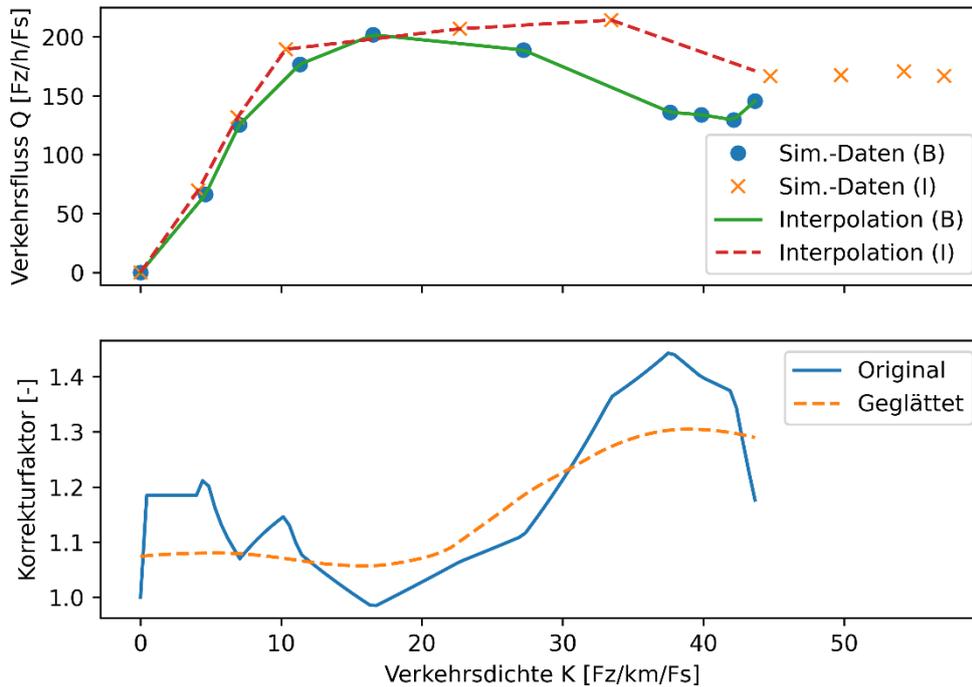


Abbildung 26: Korrekturfaktor für das innovative Szenario und den Streckenzug IG

Aus der Abbildung wird klar ersichtlich, dass im innovativen Szenario für den Streckenzug IG signifikante relative Verkehrsflusssteigerungen erzielt werden. Nach dem Erreichen der Kapazität liegt der Korrekturfaktor zwischen 1,3 und 1,4, was einer 30 – 40-prozentigen Steigerung des Verkehrsflusses im Vergleich zum Basisszenario entspricht. Des Weiteren wird darauf hingewiesen, dass der Korrekturfaktor bei niedrigen Verkehrsdichten bis 1,2 steigt. Diese Steigerung liegt jedoch daran, dass bei niedrigen Verkehrsstärken kleine absolute Unterschiede in den Ergebnissen aus relativer Perspektive größer erscheinen. Aus den FD geht jedoch hervor, dass diese Unterschiede zu vernachlässigen sind.

#### 4.8.2.2.3. Sättigungsverkehrsstärke

Erneut wurden für die Streckenzüge die Sättigungsverkehrsstärken berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt. Die Ergebnisse sind ambivalent, es kommt sowohl zur Steigerung als auch zu einer Verringerung im Vergleich zum Basisszenario. Ähnlich zum konservativen Szenario (siehe Abschnitt 4.8.1.3) kann dies aufgrund von Interaktionen der Verkehrsströme an benachbarten Knotenpunkten, Abbiegeströmen und geringen Auslastungen der Sonderfahrstreifen der Fall sein. Es sei erneut darauf hingewiesen, dass in Anhang 9.4 die Sättigungsverkehrsstärke für einen einzelnen Knotenpunkt untersucht wird.

Tabelle 12: Sättigungsverkehrsstärken für das innovative Szenario

Streckenzug	Szenario	Sättigungsverkehrsstärke [Fz/h/Spur]	Korrekturfaktor [-]
IM	Basis	2133	1,00
IM	Innovativ	1724	0,81
IG	Basis	501	1,00
IG	Innovativ	311	0,62
MUC	Basis	1155	1,00
MUC	Innovativ	1214	1,05

#### 4.8.2.2.4. Rückstaulänge

Auch für das innovative Szenario wurden die durchschnittlichen Rückstaulängen ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 dargestellt. Es kommen sowohl höhere als auch niedrigere Werte vor. Es lässt sich daher erneut kein klarer Trend erkennen. Dies bestätigt die Vermutung aus Abschnitt 4.8.1.4, dass andere Aspekte des Verkehrssystems (z.B. Verkehrsnachfrage, Verkehrsinfrastruktur, etc.) einen größeren Einfluss auf die Rückstaulängen haben als der Durchdringungsgrad von AVF.

Tabelle 13: Rückstaulängen für das innovative Szenario

Streckenzug	Szenario	Rückstaulänge [m]	Korrekturfaktor [-]
IM	Basis	24	1,00
IM	Innovativ	23	0,94
IG	Basis	22	1,00
IG	Innovativ	21	0,99
MUC	Basis	19	1,00
MUC	Innovativ	19	1,01

#### 4.8.3. Visionäres Szenario

Für das visionäre Szenario wurde nur die Streckenzugebene analysiert. Zudem wird hier nur das Fundamentaldiagramm als Leistungskennzahl ausgewertet, da aufgrund der fehlenden konstanten LSA Umlaufzeiten bedingt durch das verwendete Steuerungsverfahren (siehe Abschnitt 4.4.3.4), keine sinnvollen Angaben zu den weiteren Kennzahlen gemacht werden können.

### 4.8.3.1. Fundamentaldiagramm

Auch hier lassen sich FDs aus den Simulationsergebnissen ableiten, siehe Abbildung 21. Da jeder Datenpunkt das vorangestellte Training des Reglers auf die jeweilige Verkehrssituation beinhaltet, ist der Rechenaufwand sehr groß. Daher wurde eine geringere Anzahl an virtuellen Messpunkten für die Darstellung des FDs berechnet als in den vorangegangenen Szenarien, was jedoch keine größeren Auswirkungen auf die Interpretation der Ergebnisse zur Folge hat. Die blaue Kurve zeigt erneut das Basisszenario mit keinen AVF im Verkehrsfluss. Die grüne Kurve stellt ein Vergleichsszenario dar, in welchem 95 % der Fahrzeuge automatisiert und vernetzt sind, aber die gewöhnliche Festzeitsteuerung an Knotenpunkten aktiv ist. Die rote Kurve stellt ein weiteres Vergleichsszenario dar, in welchem 95 % der Fahrzeuge automatisiert und vernetzt sind, aber die Knotenpunkte über eine verkehrsabhängige Steuerung geregelt sind. Hierfür wurden Standardwerte aus SUMO verwendet. Die orange Kurve entspricht schlussendlich dem visionären Szenario, also einem Durchdringungsgrad von 95 % und einer RL-Signalsteuerung.

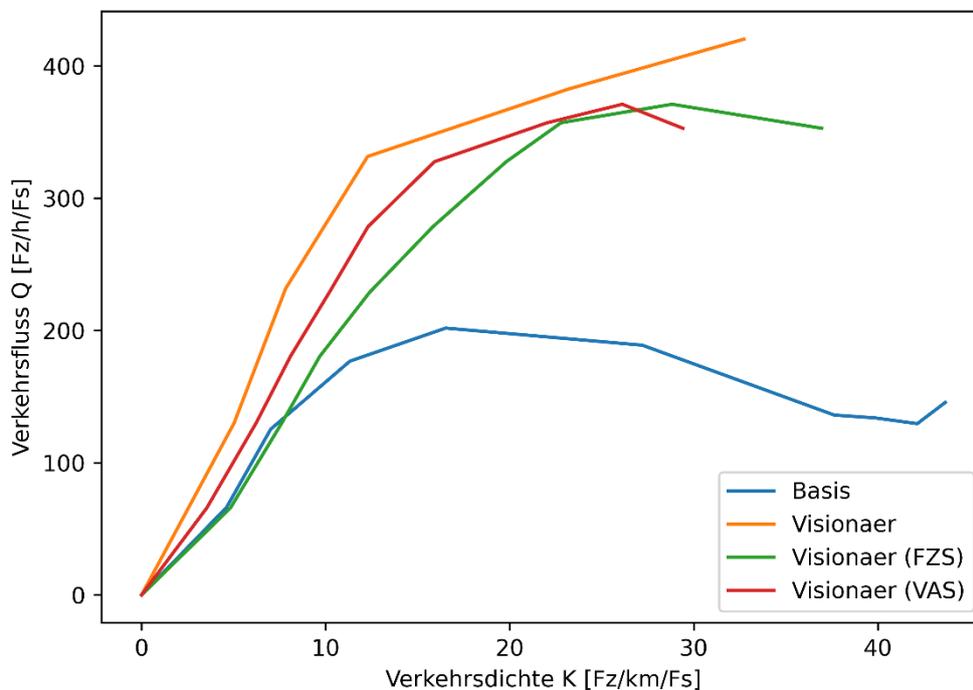


Abbildung 21: Fundamentaldiagramm für das visionäre Szenario und den Streckenzug IG. Zusätzlich wird ein Vergleichsszenario basierend auf der Festzeitsteuerung (FZS) und einer verkehrsabhängigen Steuerung (VAS) dargestellt.

Erwartungsgemäß sind die auftretenden Verkehrsstärken der visionären Szenarien viel höher als im Basisszenario. Dies ist bereits bei niedrigen Verkehrsdichten der Fall, und

liegt zum Teil auch an dem hohen Durchdringungsgrad von 95 % im visionären Szenario und den geringen Zeitlücken der AVF, wie die Vergleichsszenarien aufzeigen. Es ist jedoch zu bemerken, dass die RL-Steuerung zu einer weiteren substanziellen Erhöhung der Effekte der geringen Zeitlücken führt. D.h., die Optimierung der Signale auf Basis der Daten der Fahrzeuge kann zu enormen Leistungssteigerungen führen, sogar im Vergleich zur verkehrsabhängigen Steuerung. Im gezeigten Fall wird die Kapazität im Vergleich zum Basisszenario mindestens verdoppelt. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse hier klar, dass eine große Variabilität in den Signalzeiten durchaus auch positive Auswirkungen haben kann. Dies ist eine interessante Erkenntnis mit Hinblick auf die im Allgemeinen etablierte Meinung, dass mit möglichst wenig Variabilität die Effekte von GLOSA wirksam eingesetzt werden können und dadurch größere Verkehrsstärken erzielt werden können.

#### 4.8.3.2. Korrekturfaktor zum Fundamentaldiagramm

Der Korrekturfaktor spiegelt das ebenso wider, da er eine Höhe bis zu 2,5 für den evaluierten Streckenzug erreicht (siehe Abbildung 22). Insgesamt ist dies ein erwartetes Ergebnis, da die Knotenpunkte den größten Einfluss auf urbane Kapazitäten ausüben. Dennoch lassen die hier gezeigten Ergebnisse Rückschlüsse in einer quantifizierten Art und Weise ziehen.

Damit stellt eine auf RL basierende Verkehrssteuerung eine Möglichkeit dar, die Vorteile der AVF auszunutzen, auch wenn kein Durchdringungsgrad von 100 % vorhanden ist. Dies ist zum Beispiel bei den Konzepten des *Automated Intersection Managements* zwingend notwendig, wie in Abschnitt 3.4 aufgeführt. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die fehlende Regelmäßigkeit im Ablauf der Signalsteuerung für menschliche Fahrer sehr herausfordernd sein kann.

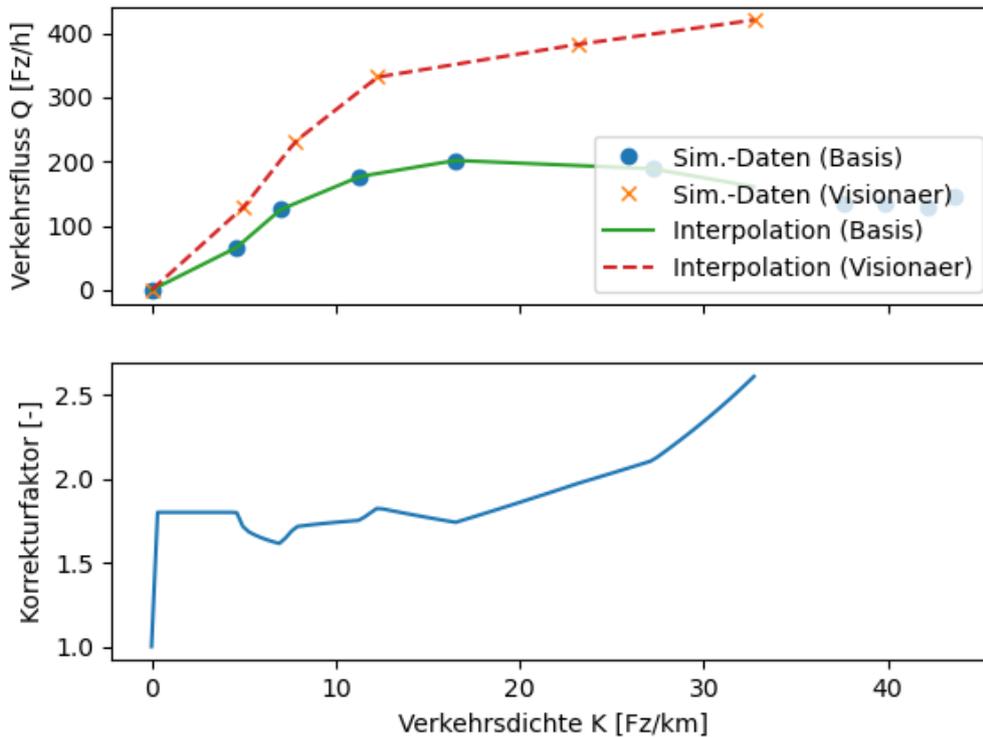


Abbildung 22: Korrekturfaktor für das visionäre Szenario und den Streckenzug IG

## 4.9. Aussagekraft der Berechnungsansätze

Die Automatisierung und Vernetzung von Fahrzeugen verändert das Fahr(zeug)verhalten während des Abstandhaltens zum Vorderfahrzeug, aber auch bei Manövern wie Fahrstreifenwechsellvorgängen und Verflechtungen. Dieses geänderte Fahrverhalten wird mittels entsprechender Verhaltensmodelle in der Simulation abgebildet. Diese Verhaltensmodelle bedürfen bestimmter Parametereinstellungen, welche die Automatisierungs- und Vernetzungsfunktion abbilden sollen. Im Kapitel 3 wurde detailliert auf die entsprechenden Modellierungsaspekte eingegangen.

Diese Modelle wurden im Zuge dieses Projekts in vier verschiedenen Streckenzügen eingesetzt. Diese Streckenzüge bilden zum einen die Komplexität und Vielfalt des urbanen Straßenraums ab und erlauben zum anderen die Untersuchung der Effekte der AVF auf die Leistungsfähigkeit in den entsprechenden Umfeldern.

Die verschiedenen Szenarien und Streckenzüge beleuchten dabei den Einfluss der zugrundeliegenden Topographien, Durchdringungsgrade sowie der eingesetzten Verkehrsmanagementmaßnahmen. Die erzielten Resultate zeigen, dass durch das Aufkommen von AVF im Verkehrsfluss bei den gewählten Modellen und Annahmen grundsätzlich mit einer Leistungssteigerung im urbanen Raum gerechnet werden kann.

Dennoch sind die Ergebnisse auch kritisch zu hinterfragen. Erstens muss klar festgestellt werden, dass die Resultate in Abhängigkeit der verwendeten Verhaltensmodelle sind. In den Berechnungen wurden Modelle angewandt, die dem aktuellen Stand der Wissenschaft entsprechen und in früheren Forschungsprojekten mittels Daten aus Feldversuchen kalibriert wurden. Um die Aussagekraft der Berechnungen weiter zu erhöhen, müssten die Modelle und die gewählten Streckenzüge rückgekoppelt werden. Die Modelle müssten dazu auf Basis der Streckenzüge und entsprechenden empirischen AVF-Daten kalibriert und validiert werden. Dies ist jedoch aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit hochautomatisierter Fahrzeuge noch nicht möglich.

Des Weiteren war im Laufe der Berechnungen die Betrachtung einer Kombination von AVF mit lediglich zwei verschiedene Verkehrsmanagementmaßnahmen eingeschränkt. Obwohl versucht wurde, damit sowohl das Element Strecke (Maßnahme Sonderfahrstreifen) als auch das Element Knotenpunkt (Maßnahme Signalsteuerung) zu untersuchen, gibt es selbstverständlich weitere Maßnahmen, die nicht modelliert wurden und deren Auswirkungen in Kombination mit AVF daher im hier fokussierten urbanen Kontext zunächst weiterer Untersuchungen bedarf. Solche Maßnahmen sind zum Beispiel die Einführung einer Citymaut oder die Bereitstellung von relevanten Informationen zur Routenwahl. Allerdings resultieren diese Maßnahmen oft in einer veränderten Nachfrage im Netz, was die angewandte Berechnungsmethodik indirekt berücksichtigt. Da verschiedene Nachfrageintensitäten beleuchtet werden, erlauben es die Ergebnisse, bei gegebener Nachfrage entsprechende Folgen solcher Maßnahmen für das AVF abzuschätzen. Zudem ist es unter anderem das Ziel dieser Berechnungen, aufzuzeigen, dass die Ableitung von Korrekturfaktoren möglich und sinnvoll ist und dass sich anhand dieser Faktoren der Einfluss von AVF auf den Verkehrsfluss unter gegebenen Randbedingungen quantifizieren lässt. Dies ist unabhängig von den eingesetzten Verkehrsmanagementmaßnahmen durchführbar.

Zusätzlich muss festgehalten werden, dass der Aspekt der Kommunikation zwischen Fahrzeugen und zwischen der Infrastruktur und den Fahrzeugen über interne Einstellungen in der Simulationssoftware und Parametrisierung des Fahrverhaltens modelliert wurde. So wurden zum Beispiel die entsprechenden Parameter für Fahrstreifenwechsel so gewählt, dass kooperative Fahrstreifenwechsel gehäuft durchgeführt wurden. Zudem verfügen die automatisierten Fahrzeuge über eine GLOSA-Schnittstelle und kommunizieren so mit den LSA. Die internen Modelleinstellungen wurden für die hier vorliegenden Fragestellungen bestmöglich gewählt, lassen aber noch Raum für Verfeinerungen offen.

Leistungssteigerung städtischer Straßennetze: Schlussbericht

So könnten zum Beispiel externe Module an die Simulation gekoppelt werden, um eine realistische Kommunikation zu integrieren. Dies war in diesem Projekt nicht vorgesehen.

## 5. Befragung von Fachleuten

### 5.1. Zielsetzung

Um die Ergebnisse aus den verkehrstechnischen Berechnungen kritisch zu hinterfragen, sowie den Zusammenhang von Automatisierung und Leistungsfähigkeit im städtischen Kontext und dessen Berücksichtigung in FGSV-Regelwerken zu diskutieren, wurden Befragungen von Fachleuten aus relevanten FGSV-Gremien durchgeführt. De facto wurden Interviews mit Vertretern aus den folgenden Arbeitsausschüssen (AA) durchgeführt:

- AA 3.1 Telematik
- AA 3.3 Verkehrsbeeinflussung innerorts
- AA 3.10 Theoretische Grundlagen des Straßenverkehrs
- AA 3.13 Qualität des Verkehrsablaufs

Dieser Austausch mit der Fachszene ist essentiell, um eine hohe Ergebnisqualität gewährleisten zu können und die Ergebnisse im aktuellen Wissensstand besser einordnen zu können. Die getroffene Auswahl der FGSV-Gremien ermöglicht, dass sowohl aus übergeordneter (AA 3.1), aus theoretischer (AA 3.10), sowie aus der sehr Regelwerksnahen Perspektive (AA 3.3 und 3.13) ein kritischer Blick auf das Vorgehen und die Ergebnisse geworfen werden kann. Des Weiteren wird ein sehr umfassendes Bild zum Entwicklungsstand von AVF-bezogenen Theorien und Technologien im Kontext der Verkehrstechnik in Deutschland garantiert.

Das Kapitel ist wie folgt gegliedert. Im nachfolgenden Abschnitt 5.2 wird das Vorgehen zur Befragung erläutert. In Abschnitt 5.3 werden die Ergebnisse bezüglich der Modellierung von AVF in Simulationsszenarien wiedergegeben. In Abschnitt 5.4 werden die Ergebnisse bezüglich der Wirkungen von AVF in den Regelwerken dargelegt.

### 5.2. Vorgehen

Es wurden insgesamt neun Befragungen von einer Länge zwischen einer und zwei Stunden durchgeführt. Dabei wurden zuerst das Projekt inklusive dessen Ziele, das Vorgehen und beispielhafte Berechnungsergebnisse für jedes Zukunftsszenario und jeweils einen Streckenzug vorgestellt. Dann wurden neun bis elf Fragen gestellt, welche sich

auf die relevanten Aspekte von AVF aus Perspektive der Fachperson, auf Forschungsaktivitäten dazu im jeweiligen AA, auf den Nutzen der Simulationsergebnisse des Projekts für diese Forschungsaktivitäten und auf relevante zukünftige Forschungsfelder bezogen. Die expliziten Interviewfragen sind in Anhang 9.5 aufgeführt. In der Regel entwickelte sich bereits während der Vorstellung des Projekts eine Diskussion, die einen fließenden Übergang in die Beantwortung der Fragen ermöglichte.

### 5.3. Modellierung von AVF in Simulationsszenarien

Im Zuge der Befragung der Fachleute wurden fachspezifische Einschätzungen der Befragten zur Modellierung, aber auch zum Einfluss der AVF auf das Verkehrsgeschehen und die Leistungsfähigkeit offenbar.

Der in der Szenariensimulation gewählte Ansatz der mikroskopischen Simulation wurde gutgeheißen, da er es ermöglicht, gewisse Aspekte endogen betrachten zu können. Gerade beim Vorhandensein von unterschiedlichem Fahrverhalten und Fahrzeugklassen wurde bestätigt, dass eine mikroskopische Simulation die richtige Wahl ist. Zudem können die Ergebnisse solcher Modelle die Aussagekraft der makroskopischen Modelle im Hinblick auf AVF-Aspekte verbessern. Allerdings wurde betont, dass die Angabe von Modellannahmen wichtig ist, damit die Ergebnisse entsprechend eingeordnet und interpretiert werden können.

Die gewählten Fahrzeugfolgemodelle, welche auf dem weitverbreiteten Wiedemann99-Modell basieren, wurden kritisch beleuchtet. Dieses wird der Klasse der „psychisch-physischen“ Modelle zugeschrieben und es versucht, das menschliche Fahrverhalten abzubilden. Es lässt sich zu Recht hinterfragen, warum solche Aspekte in der Modellierung von AVF vonnöten sind, da diese Fahrzeuge per Definition keine psychischen Aspekte im Fahrverhalten beinhalten. In diesem Zusammenhang kristallisierten sich drei Punkte in den Meinungen der Befragten heraus:

1. Eine „menschliche“ Fahrweise von AVF würde vermutlich dazu führen, dass etwaige menschliche Fahrer sich im Verkehrsstrom wohler fühlen würden, da diese Fahrweise ihrer Erfahrung entspräche. Es könnte daher möglich sein, dass AVF in Zukunft entsprechend fahren. Daher kann das Modell der Fahrweise auf Basis des Wiedemann99 als verwendbar angesehen werden.
2. Viele alternative Modelle, die das Fahrverhalten von AVF abbilden, sind ebenfalls auf Basis von Ansätzen entwickelt worden, die ursprünglich zur Modellierung des menschlichen Verhaltens entworfen wurden. Dies ist daher ein gängiger Ansatz.

3. Im Idealfall könnten die Algorithmen der Automobilhersteller direkt in die Simulationssoftware integriert werden. Dies scheitert jedoch daran, dass jene diese Algorithmen als Geschäftsgeheimnis hüten. Es muss daher meist auf Alternativen zurückgegriffen werden.

Die Simulationsergebnisse zur Leistungsfähigkeit der Streckenzüge wurden unterschiedlich kommentiert, was die in der Fachszene vorherrschende Uneinigkeit zu dieser Thematik gut widerspiegelt. Es gibt sowohl Meinungen, die ähnlich zu den Berechnungsergebnissen von einer Kapazitätssteigerung ausgehen. Andererseits wurde auch Skepsis angemeldet, ob die aufgezeigten Steigerungen realistisch seien. Diese Skepsis basiert auf den Überlegungen, dass Sicherheit stets das oberste Gebot bleiben werde und dies eine sehr konservative Fahrweise nach sich ziehen würde, sowie, dass es möglicherweise nicht zu sehr hohen Durchdringungsgraden in städtischen Räumen kommen wird. Einigkeit herrschte jedoch darüber, dass prinzipiell ein Einfluss durch AVF auf das Verkehrsgeschehen vorhanden sein wird. Es wurde zudem betont, dass die Kooperation und Kommunikation zwischen den Fahrzeugen sowie mit der Infrastruktur ein sehr wichtiges Element sein wird.

Es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass die Berechnungsergebnisse vorwiegend von den Modellannahmen abhängen. Gewissheit kann in dieser Frage erst anhand erster empirischer Daten erlangt werden. Dies ermöglicht dann auch die genauere Modellierung und die Verifizierung von getroffenen Annahmen. Der Nutzen der Ergebnisse der verkehrstechnischen Berechnung in Abschnitt 4 für den Wissenstand betrifft vor allem das Aufzeigen einer optimistischen Zukunftsentwicklung sowie die Berücksichtigung der komplexen Realität aus Perspektive der Streckenzugstopologie.

## 5.4. Wirkungen von AVF in den Regelwerken

Im Zuge der Befragung wurde auch die Thematik einer Anpassung der FGSV-Schriften, um die Wirkungen von AVF im Verkehrsfluss auf den Verkehrsablauf zu berücksichtigen, diskutiert.

Generell wird der Vorschlag, AVF perspektivisch in den Regelwerken zu berücksichtigen, positiv aufgenommen – sei es über entsprechende Abschnitte in den „Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“, um Praktikern erste Parameterwerte für die entsprechenden Modelle liefern zu können oder in Form von Korrekturfaktoren in einem gesonderten Kapitel des HBS. Die entsprechenden Aussagen lassen sich in den folgenden vier Punkten zusammenfassen.

- *Handlungsbedarf:* Genereller Handlungsbedarf wurde nur im Arbeitskreis 3.1.9 „Automatisiertes Fahren - Begleitung der Vorbereitungs- und Einführungsphasen“ identifiziert, allerdings wurde seit längerem kein substanzieller Fortschritt mehr erzielt und zudem noch nichts publiziert. Jedoch wurde erwähnt, dass nach wie vor eine entsprechende Publikation geplant sei. Abseits dieses Arbeitskreises wird die Fortschreibung der FGSV-Regelwerke bezüglich des hochautomatisierten und vernetzten Fahrens noch nicht priorisiert. Die Regelwerke stellen den ‚Stand der Technik‘ dar und zukünftige, mit Unsicherheit behaftete Entwicklungen sollen nicht abgebildet werden. Da schlichtweg viel zu wenige empirische Daten für AVF und dessen Einfluss auf den städtischen Verkehrsablauf existieren, kann dieses Thema noch nicht zufriedenstellend eingebunden werden. Stattdessen wird derzeit daran gearbeitet, das Tempo 30 und 40 als Geschwindigkeitslimit mit ins HBS aufzunehmen. Für die Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RILSA) beziehen sich die aktuellen Themen mit großer Priorität auf vulnerable Verkehrsteilnehmer.
- *Komplexität:* Zudem wurde von den Fachleuten angemerkt, dass eine genügend genaue Berücksichtigung von AVF auf den Verkehrsablauf die angepeilte hohe Anwendbarkeit des HBS übersteigen könnte, da unweigerlich zusätzliche Komplexität in die Berechnungen einfließen würde, welche nicht mehr durch Handrechenverfahren abbildbar wäre. Dies würde daher dem Grundsatz des HBS widersprechen. Teils wurde ausgesagt, dass die aktuell vorhandene Komplexität bereits zu hoch ist. Um damit umgehen zu können, wurde mehrfach vorgeschlagen, das Thema in die „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ mitaufzunehmen und dort entsprechend zu behandeln. Mit einer Aufstufung der Hinweise zu einer Richtlinie würde dieses Dokument auch an Verbindlichkeit und somit Relevanz für die Praxis gewinnen. Idealerweise könnten dort Standardmodelle und beispielhafte Parametersätze beschrieben werden, sodass eine Vergleichbarkeit in den Aussagen verschiedener Anwendungen und Projekte erreicht werden kann. Nichtsdestotrotz wurde mehrfach betont, dass ohne empirische Daten zur weiteren Kalibrierung kein weiterer Fortschritt in der Modellierung von AVF über das vorliegende F+E-Vorhaben hinaus zu erwarten sei.
- *Korrekturfaktoren:* Der Vorschlag, Korrekturfaktoren zu verwenden, um den Einfluss der AVF auf etwaige Kennwerte im HBS darzustellen, wurde überwiegend positiv bewertet. Es wurde zudem angemerkt, dass gerade für den vorgestellten

Fall des Fundamentaldiagramms solche Faktoren auch für Straßenverkehrsanlagen außerorts von Interesse seien. Diese Beobachtung ist auch mit internationalen Forschungsprojekten im Einklang. So wurden zum Beispiel im *Highway Capacity Manual*, dem Pendant zum HBS in den USA, solche Korrekturfaktoren für den Autobahnverkehr vorgeschlagen.

- *Steuerungsverfahren*: Zum Thema der Anpassung der RILSA wurde mehrfach angedeutet, dass nur wenig Potential in den AVF zur Verbesserung der Lichtsignalsteuerung gesehen wird. Ein großer Teil des Regelwerks behandelt die Festzeitsteuerung, die maßgeblich durch veränderte Sättigungsverkehrsstärken beeinflusst werden könnte. Diese sind jedoch aus dem HBS zu entnehmen und müssen somit nicht nochmals explizit angepasst werden. Verkehrsabhängige Steuerungsformen könnten zwar vom Aufkommen von AVF profitieren, doch dazu ist noch zu wenig Wissen vorhanden. Zudem müssten dann ganze Kapitel neu geschrieben werden. Des Weiteren wurde angemerkt, dass stets auf den schwächsten Verkehrsteilnehmer zu bemessen sei. D.h., dass die AVF erst bei sehr hohen Durchdringungsgraden (>95 %) oder sogar nur bei sortenreinem Verkehr entsprechend berücksichtigt werden könnten. Dem kann entgegnet werden, dass die Steuerungsverfahren sehr wohl von der verbesserten Datenlage profitieren können, da dann Kennzahlen von Bemessungsrelevanz (z.B. Rückstaulängen, Wartezeiten) genauer abgeschätzt werden können. Davon würden in logischer Konsequenz schließlich auch die Steuerungsverfahren genauer bemessen werden können.

## 6. Ergebnissynthese

### 6.1. Zielsetzung

Zielsetzung des vorliegenden Kapitels ist es, die Ergebnisse aus den verkehrstechnischen Berechnungen und den Befragungen der Fachleute zu synthetisieren und daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten. Damit soll sichergestellt werden, dass sowohl basierend auf konkreten Experimenten, d.h., den Simulationsszenarien, aber auch das generelle Bild von Fachkräften aus der Szene bei der Erstellung von Handlungsempfehlungen berücksichtigt wird.

Das Kapitel ist wie folgt gegliedert. Im nachfolgenden Abschnitt 6.2 wird das Vorgehen zur Analyse der FGSV-Regelwerke sowie der Ergebnissynthese erläutert. In Abschnitt 6.3 werden die Ergebnisse zu den Kenngrößen des Verkehrsablaufs zusammengefasst. In Abschnitt 6.4 wird der Anpassungsbedarf der untersuchten FGSV-Schriften erläutert. Zuletzt werden in Abschnitt 6.5 Handlungsempfehlungen für Forschung und Praxis aufgestellt.

### 6.2. Vorgehen

Um das oben beschriebene Ziel zu erreichen, werden in drei Schritten auf Basis der in Abschnitt 4.8 gezeigten Simulationsergebnissen sowie der Befragungen konkrete Handlungsempfehlungen erarbeitet:

1. Zuerst werden in Abschnitt 6.3 der Zusammenhang und die Wechselwirkungen zwischen AVF und der Leistungsfähigkeit des Stadtverkehrs auf Basis der Simulationsergebnisse vertieft untersucht. Dies geschieht anhand der Interpretation der Kenngrößen des Verkehrsablaufs in der Simulation.
2. Im zweiten Schritt werden in Abschnitt 6.4 ausgewählte Handbücher, Regelwerke und Hinweisschriften der FGSV im Kontext des AVF analysiert. Dies ermöglicht die gezielte Ableitung von Formeln und Parametern, sowie visuell dargestellten Zusammenhängen, welche durch AVF beeinflusst werden können. Zusätzlich werden die Ergebnisse der verkehrstechnischen Berechnungen in Bezug zu ausgewählten Berechnungsverfahren und Kennwerten gesetzt. Dabei werden Anpassungen der Verfahren und Werte vorgeschlagen und diese in Beispielrech-

nungen vorgestellt sowie entsprechende Textbausteine formuliert. So kann dargelegt werden, wie bei geeigneter Datenlage eine Anpassung der Regelwerke aussehen könnte.

3. Schließlich werden in Abschnitt 6.5 konkrete Handlungsempfehlungen auf Basis der vorangegangenen Interpretation der Berechnungsergebnisse, der Befragung der Fachleute, sowie der Analyse der FGSV-Schriften formuliert. Diese zielen sowohl darauf ab, weitere Forschungsfelder zu identifizieren, als auch Hilfestellungen zum Umgang mit AVF in verkehrstechnischen Berechnungen in der Praxis zu liefern.

### 6.3. Kenngrößen des Verkehrsablaufs in der Simulation

Die Leistungsfähigkeit einer Verkehrsanlage wird mit ihrer Kapazität gleichgesetzt. Letztere wird in den Begriffsbestimmungen der FGSV als „Größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom unter den gegebenen baulichen, verkehrlichen und betrieblichen Bedingungen erreichen kann“ definiert. Anhand dieser Definition wird klar, dass sich die Bedingungen durch die Einführung von AVF und daher die Kapazität ändern können. Dadurch entsteht ein Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit und der Automatisierung und Vernetzung des Straßenverkehrs.

Daher werden in der Folge die Berechnungsergebnisse aus Abschnitt 4.8 aus einer übergeordneten Perspektive des Verkehrsablaufs betrachtet und dabei die entsprechenden Indikatoren interpretiert. Auf der Streckenzugesebene sind dies das Fundamentaldiagramm und daraus abzuleitende Kapazitätskennwerte. Auf der Knotenpunktebene sind vor allem Sättigungsverkehrsstärken von Interesse.

- *Fundamentaldiagramme und Kapazitätskennwerte:* Für jedes Zukunftsszenario und Streckenzug wurden mehrere Nachfrageintensitäten berücksichtigt. Somit konnten die Fundamentaldiagramme auf der Streckenzugesebene dargestellt werden und eine Kapazität abgeschätzt werden. Wie die bereits in Abschnitt 4.8 beschriebenen Diagramme zeigen, hat die Automatisierung, so wie sie im Zuge dieses Projekts modelliert wurde, einen positiven Effekt auf die Kapazitäten. Es ist jedoch explizit darauf hinzuweisen, dass in der Literatur konservativere Modelle existieren, welche zu niedrigeren Leistungssteigerungen bis hin zu einer Reduktion derer führen können. Nichtsdestotrotz zeigen die Ergebnisse, dass für den Fall, dass AVF einen ähnlich risikobereiten Fahrstil wie menschliche

Fahrer haben und zusätzlich die Infrastruktur entsprechend angepasst werden kann (siehe visionäres Szenario in Abschnitt 4.8.3), eine erhebliche Kapazitätssteigerung möglich ist. Der Bandbreiten der Kapazitätssteigerungen variieren dabei zwischen einem Faktor 1,1 und 2,5.

- *Sättigungsverkehrsstärken:* Für ausgewählte einzelne Knotenpunkte in den Streckenzügen wurden zudem die Sättigungsverkehrsstärken untersucht und die zu erwartende Steigerung beobachtet. Hier ist jedoch eine „wahre“ Sättigungsverkehrsstärke schwerer einzugrenzen, da es zu vielen Interaktionen von Fahrzeugen im Knotenpunktsbereich kommt und die ankommenden Flüsse auch von der Situation stromaufwärts abhängen. Dies spiegelt sich in den Ergebnissen zum innovativen Szenario wider, wo geringere Sättigungsverkehrsstärken gemessen werden. Dies weist darauf hin, dass durch den AVF-Fahrstreifen zusätzliche Konflikte in den Kreuzungsbereichen existieren, die schlussendlich zu einer Verringerung der Sättigungsverkehrsstärke führen. Beim konservativen Szenario auf Streckenzugsebene wurden größtenteils leichte Steigerungen der Sättigungsverkehrsstärken beobachtet. Die Analyse eines isolierten Knotenpunkts im Anhang 9.4 zeigt, dass die Sättigungsverkehrsstärke erwartungsgemäß mit dem Durchdringungsgrad von AVF steigt.
- *Fahrzeugfolgeparameter und Parameter für Fahrstreifenwechsel:* Wie bereits oben erwähnt, kommt bei gleichbleibender Knotenpunktregelung der größte Einfluss auf die Leistungsfähigkeit durch die gewählte Parametrisierung der Fahrverhaltensmodelle. Hier wurde im vorliegenden Projekt auf Basis von in der Literatur beschriebenen Modellen ein optimistischer Ansatz gewählt. D.h., es wurden nicht die konservativsten Modelle gewählt. Dadurch kann im Rückschluss gezeigt werden, welches Fahrverhalten AVF annehmen müssen, damit es in realistischen städtischen Umgebungen zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit kommen kann. Außerdem ist anzunehmen, dass sich hohe Marktdurchdringungsraten erst bei entsprechender Leistungsfähigkeit der Systeme einstellen.
- *Angepasste Verkehrsführungen:* Einen weiteren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit können angepasste Verkehrsführungen haben. Im Projekt wurden diesbezüglich Sonderfahrstreifen und eine *Reinforcement Learning*-basierte Knotenpunktregelung untersucht. Die Ergebnisse der entsprechenden innovativen und visionären Zukunftsszenarien zeigen auf, dass ein entsprechender Einfluss der Verkehrsführung auf den Verkehrsablauf erwartungsgemäß existiert. Im innovativen Szenario wurde durch den Einsatz eines Sonderfahrstreifens der generell

positive Effekt der AVF auf die Kapazität neutralisiert, sodass es zu keinen nennenswerten Steigerungen der Verkehrsflüsse kam. Es wurde geschlussfolgert, dass Sonderfahrstreifen daher auf Basis anderer Kennwerte argumentiert werden müssen. Eine Möglichkeit ist dabei die gesteigerte Verkehrssicherheit, wie Ergebnisse aus anderen Projekten (Verbundpartner, 2019) gezeigt haben. Die angepasste Knotenpunktregelung wurde im visionären Szenario untersucht, indem eine *Reinforcement Learning*-basierte Steuerung untersucht wurde. Hier konnte gezeigt werden, dass die flexible Steuerung die sehr gute Datenlage bei einem hohen Durchdringungsgrad von AVF sehr gut nutzen kann. Die Kapazität konnte entsprechend um ca. Faktor 2,5 erhöht werden.

- *Verkehrsprognosen*: Obwohl das Thema der Verkehrsnachfrage nicht explizit im Projekt behandelt wurde, lassen sich dennoch Hinweise zur Entwicklung der zukünftigen Verkehrsnachfrage und somit der Prognosen formulieren. Die befragten Fachleute stimmen darin überein, dass höhere Kapazität in einem System die durchschnittlichen Reisezeiten vorerst verringern, welche aus den gesteigerten durchschnittlichen Geschwindigkeiten folgen. Verringerte Reisezeiten induzieren wiederum Verkehrsnachfrage, wodurch die Kapazitäten schnell ausgelastet werden können und der prognostizierte Verkehr entsprechend beeinflusst werden kann. Da im Projekt für die verschiedenen Zukunftsszenarien stets Kapazitätssteigerungen als Ergebnis erarbeitet wurden, kann von einer veränderten Verkehrsnachfrage ausgegangen werden. Die Verkehrsnachfrage an sich ist jedoch ein komplexes Thema, da sie von einer Vielzahl an Faktoren abhängt. Zum Beispiel kann auch der gestiegene Komfort in automatisierten Fahrzeugen, der daraus resultiert, dass die Fahraufgabe abgegeben werden kann, dazu führen, dass längere Reisezeiten akzeptiert werden. D.h., dass es eventuell zu mehr Stau käme und daher Verkehrsprognosen dies entsprechend berücksichtigen müssten. Zudem kann die Verkehrsnachfrage nicht direkt gemessen werden, sondern kann nur auf Basis von Befragungen und Verkehrszählraten geschätzt werden. Diese Schätzmodelle variieren sowohl in ihrer Natur als auch in ihrer Komplexität. Dies spiegelt sich in der Vielzahl an möglichen Methoden sowie der nach wie vor aktiven Forschung dazu wider. Aus diesem Grund sprengt eine entsprechende Untersuchung den Rahmen dieses Projekts.

## 6.4. Anpassungsbedarf des FGSV-Regelwerks

Im Zuge des Aufkommens von AVF im zukünftigen Verkehrsgeschehen wird es einige Änderungen bezüglich des Fahrverhaltens der Fahrzeuge geben. Um diese Änderungen in die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen miteinfließen lassen zu können, müssen die entsprechenden Schriften dahingehend aktualisiert und angepasst werden. Da die effektiven Einflüsse der Automatisierung auf die Leistungsfähigkeit noch nicht abschließend abzuschätzen sind, werden im Folgenden zuerst die Regelwerke hinsichtlich des theoretischen Anpassungsbedarfs untersucht. Dann wird anhand eines Beispiels aus dem HBS aufgezeigt, wie eine Anpassung erfolgen könnte, wären empirische Daten analog zu den Berechnungsergebnissen aus Abschnitt 4 vorhanden.

### 6.4.1. Theoretisch notwendige Anpassungen

Hier wird im Wesentlichen herausgearbeitet, zu welchen Inhalten und in welchen Kapiteln ausgewählter FGSV Schriften auf Basis der Simulationsergebnisse und Fachpersonbefragungen Änderungsbedarf besteht. Der Fokus liegt hierbei auf den Hinweisen zum Fundamentaldiagramm (FGSV, 2005) und dem HBS. Ersteres wurde ausgewählt, da das Fundamentaldiagramm im Fokus des Projekts steht und zudem ein essentielles Konzept darstellt, welches auch das HBS maßgeblich beeinflusst. Das HBS wurde ausgewählt, da es ein zentrales Regelwerk der FGSV ist. Weitere Schriften werden überblicksmäßig im Kontext von AVF vorgestellt und bestimmte Inhalte herausgestellt. Es werden die Textabschnitte, Gleichungen und Bilder behandelt, welche maßgeblich durch das Aufkommen von AVF im Verkehrsfluss beeinflusst werden würden.

#### 6.4.1.1. Hinweise zum Fundamentaldiagramm

Zuerst wird das Dokument *Hinweise zum Fundamentaldiagramm* überblicksmäßig mit Blick auf AVF analysiert. Dies geschieht unter anderem aufgrund der zentrale Rolle des Fundamentaldiagramms in diesem Forschungsprojekt zur makroskopischen Beschreibung des Verkehrsablaufs, der allgemeinen gewichtigen Rolle in der Verkehrsmodellierung und der Tatsache, dass es eine Grundlage für viele praxisrelevante Regelwerke ist.

Das Fundamentaldiagramm stellt den Zusammenhang des Verkehrsflusses  $q$ , der Verkehrsdichte  $k$ , und der momentanen mittleren Geschwindigkeit  $v_{mom}$  dar. Es ist auch die Grundlage für Bemessungsdiagramme im HBS. Die vorhandene Stochastizität der Einzelwerte bzw. Messpunktwellen des Fundamentaldiagramms könnte durch AVF etwas kleiner werden da die, in Abschnitt 1.2.2 des Hinweispapiers beschriebenen subjektiv

auf die Verkehrsteilnehmer wirkenden Einflussfaktoren bei AVF wegfallen, da hier keine Fahrer das Fahrzeug steuern. Andere Aspekte, die für Streuung der Einzelwerte im Fundamentaldiagramm verantwortlich sind, werden aber nach wie vor vorhanden sein (z.B.: Hysteresen, Einflüsse anderer Verkehrsteilnehmer, etc.).

Kapitel 3 des Hinweispapiers behandelt die Messgrundlagen von Fundamentaldiagrammen und die Bestimmung der charakteristischen makroskopischen Kenngrößen. Aufgrund von AVF können hier substanziiell veränderte Flüsse für gegebene Dichten gemessen werden, da sich die Zeitlücken ändern können. Bei einer konservativen Fahrweise könnten sich diese vergrößern, bei einer Aggressiven verkleinern. Dies würde zu einer Verringerung bzw. einer Steigerung der Flüsse für gegebene Dichten führen. Zusätzlich würde die Datenbasis für die Messung des Fundamentaldiagramms erheblich verbessert werden, wenn die von AVF gemeldete Position und Geschwindigkeit verarbeitet wird. Die Simulationsergebnisse aus Abschnitt 4.8 und zahlreiche Publikationen jüngerer Datums stellen eine solche Steigerung der Verkehrsflüsse bei gegebenen Verkehrsdichten aufgrund der Annahme von verringerten Zeitlücken bei AVF dar.

In der Verkehrspraxis gibt es diverse Umfeldeinflüsse, wie der Einfluss der Dunkelheit oder von Regen bei Helligkeit/Dunkelheit. Die in Abschnitt 4.1.1 des Hinweispapiers verwendeten Größen, welche von Umfeldeinflüssen abhängen, können sich durch AVF ändern. Abhängig von der eingesetzten Technologie, könnten Einflüsse wie Dunkelheit auf den Verkehrsfluss verringert werden. Die entsprechenden Werte müssten überarbeitet werden. Dies betrifft zum Beispiel Tabelle 4.1 bis Tabelle 4.8 im Hinweispapier, aber auch die zugehörigen Bilder und Werte im Fließtext.

#### 6.4.1.2. Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen

Das HBS ist in drei Teile aufgeteilt, welche jeweils einen bestimmten Straßentyp beschreiben. Aufgrund des Fokus des durchgeführten Projekts, wird hier der Teil S *Stadtstraßen* auf Parameter untersucht, die potentiell angepasst werden müssten, wenn AVF auf deutschen Straßen verkehren.

##### 6.4.1.2.1. Verkehrsnachfrage

Im zweiten Kapitel des HBS werden die Grundlagen zur Abschätzung der Verkehrsnachfrage behandelt. Bei der Berechnung der Verkehrsstärke eines Verkehrsstroms (Gleichung S2-1) wird zwischen den Verkehrsstärken einzelner Fahrzeugströme unterschieden, wie zum Beispiel der Krafffahrzeuge (Kfz) oder der Fahrzeuge des öffentlichen Ver-

kehrs (ÖV). Hier sollte bei der Berechnung der Fahrzeuge zwischen menschlich geführten Kraftfahrzeugen und AVF unterschieden werden. Dadurch können die Durchdringungsgrade verwendet werden, um etwaige Korrekturfaktoren zu berechnen. Ein entsprechendes Erhebungskonzept müsste dazu erarbeitet werden, könnte jedoch auf RSUs basieren. Bezüglich der Fahrzeuggruppen des Kfz-Verkehrs gibt es ein Klassifizierungsmuster gemäß den Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) (BASt, 2012), in dem die Klassifizierungsgruppe der AVF bei der Fahrzeuggruppe des Leichtverkehrs (LV) mitaufgenommen werden müsste (siehe Tabelle 2-1).

#### **6.4.1.2.2. Verkehrsqualität auf Strecken**

Das dritte Kapitel des HBS beschreibt das Verfahren zur Bestimmung der Verkehrsqualität auf Strecken bei gegebener Verkehrsnachfrage. In Abschnitt S3.2.2 „Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs“ (QSV) wird in Tabelle S3-1 die QSV in Abhängigkeit der fahrstreifenbezogenen Verkehrsdichte je Richtung aufgeführt. Diese Einteilung der einzelnen Qualitätsstufen könnte beim Vorkommen von AVF im Verkehrsfluss angepasst werden, da sich die zugrundeliegenden Fundamentaldiagramme ändern, wie in den Simulationsergebnissen in Abschnitt 4.8 gezeigt wurde. D.h., dass bei gegebener Dichte möglicherweise noch größere Verkehrsflüsse erreicht werden können und dadurch eine höhere mittlere Geschwindigkeit und folglich Verkehrsqualität.

Für die Bewertung der Verkehrsqualität (Kapitel S3.4) werden für die Bestimmung der mittleren Fahrtgeschwindigkeit  $V_F$  Fundamentaldiagramme verwendet, die in der Geschwindigkeit-Verkehrsflussebene dargestellt sind. Da sich die Fundamentaldiagramme aber durch den Einfluss von AVF erheblich ändern können (siehe Abschnitt 4.8 des vorliegenden Berichts), werden auch die entsprechenden Bilder im HBS angepasst werden müssen (Bild S3-1 bis Bild S3-5). Diese Fundamentaldiagramme wurden eingangs teilweise auch zur Anpassung der Fahrzeugfolgemodelle in der Simulation an das HBS verwendet (siehe Abschnitt 4.7). Hier besteht somit ein expliziter Bezug zu den verkehrstechnischen Berechnungen des Projekts. Dadurch wird klar, dass sich diese Bilder beim Aufkommen von AVF auf alle Fälle ändern können und bei entsprechender empirischer Datenlage angepasst werden können. Weil die Simulationen für Streckenzüge durchgeführt wurden und der Einfluss von signalisierten und nichtsignalisierten Knotenpunkten implizit in den dargestellten Fundamentaldiagrammen enthalten ist, lassen sich erste Schlüsse ziehen. Konkret lassen sich in allen Szenarien erhöhte Verkehrsflüsse bei spezifischen Geschwindigkeiten bzw. Verkehrsdichten beobachten. Um dies zu veranschaulichen, werden in Abbildung 27 Fundamentaldiagramme für einen Streckenab-

schnitt einer anbaufreien Hauptverkehrsstraße mit normalbreitem Fahrstreifen dargestellt. Dabei werden die Kurven nach den entwickelten Zukunftsszenarien unterschieden. Jedes Szenario impliziert einen bestimmten Durchdringungsgrad von AVF im Verkehrsstrom, deren Einfluss somit im Fundamentaldiagramm dargestellt werden kann.

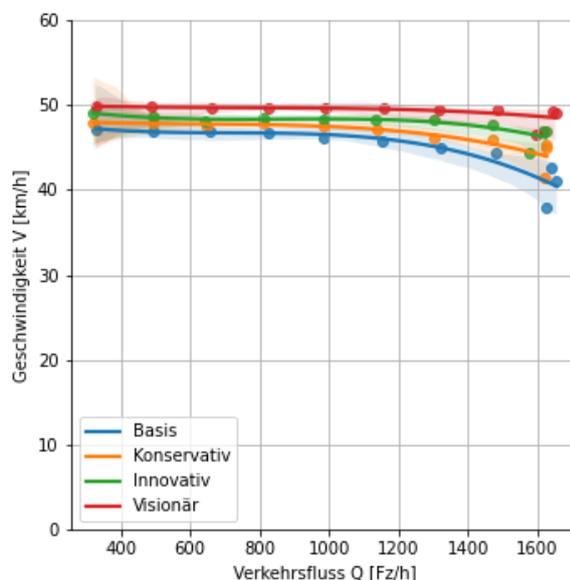


Abbildung 27: Angepasstes Geschwindigkeit-Fluss-Diagramm für die untersuchten Zukunftsszenarien

Die Kurven zeigen, dass durch höhere Durchdringungsgrade von AVF auf freien Strecken höhere Geschwindigkeiten bei bestimmten Verkehrsflüssen erreicht werden können. Auf Basis dieser Kurven ließen sich dann, wie in Abschnitt 4.6 dargestellt, Korrekturfaktoren berechnen, um den Einfluss von AVF auf der Streckenebene im HBS abzubilden.

Im HBS in Tabelle S3-2 zur Bestimmung des Faktors  $f_{FS}$  zur Berücksichtigung der Aufteilung der Verkehrsdichte müsste man die Faktorwerte für die jeweiligen Fahrstreifen für Verkehrsflüsse mit AVF anpassen. Dies ist vor allem der Fall, weil noch nicht abgeschätzt werden kann, inwiefern die Erschließungsintensität sowie die Breite der Fahrstreifen das Fahrverhalten von AVF beeinflusst werden. In Tabelle S3-3 zur Festlegung der Erschließungsintensität in Abhängigkeit von der Art und Anzahl der Erschließungsvorgänge außerhalb der Knotenpunktbereiche kann sich unter Einfluss von AVF die Einteilung der Erschließungsintensität ändern, da AVF für einen Erschließungsvorgang eine andere Zeit benötigen können. Die in Tabellen S3-4 und S3-5 verwendeten Parameter  $a(V_0)$  und  $b$ , welche für die Gleichung (S3-4) zur Darstellung der q-V-Beziehungen für Teilstrecken verwendet werden, gilt es für eine Zukunft mit AVF neu zu bestimmen. Dies ist unter anderem deshalb der Fall, weil sich AVF an die rechtlich vorgegebenen Geschwindigkeitsbegrenzungen halten werden. Im Anhang S3 werden außerdem mittlere

Dauern für bestimmte Erschließungsvorgänge festgelegt, wie zum Beispiel für Einparkvorgänge 12 Sekunden und für Bushalte auf der Fahrbahn 20 Sekunden. Die Zeiten für die einzelnen Vorgänge sollten für AVF neu untersucht werden.

#### **6.4.1.2.3. Verkehrsqualität an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen**

Das Kapitel S4 beschreibt das Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität bezüglich einer Bemessungsverkehrsstärke und eines entsprechenden Knotenpunktes mit Lichtsignalanlagen (LSA). In Tabelle S4-1 wird für die Bewertung der Verkehrsqualität eine Mindestfreigabezeit von 5 Sekunden (FGSV, 2015b) festgelegt, welche bei AVF kürzer sein kann.

Ein zentrales Element ist der die Fahrzeugfolgeabstände beschreibende Zeitbedarfswert  $t_B$  von 1,8 Sekunden sowie die Berechnung der Anpassungsfaktoren (Gleichungen S4-2 – S4-6). Sowohl der Basiswert, als auch die Anpassungsfaktoren müssen mit Hinblick auf den Einfluss von AVF neu untersucht und ggf. angepasst werden. Entsprechend müssen auch die Kurvenverläufe in den Diagrammen bezüglich der Anpassungsfaktoren  $f_b$  zur Berücksichtigung der Fahrstreifenbreite (Bild S4-1),  $f_R$  zur Berücksichtigung des Abbiegeradius  $R$  (Bild S4-2) und  $f_s$  zur Berücksichtigung der Fahrbahnlängsneigung (Bild S4-3) bei Vorkommen von AVF im Verkehrsfluss neu untersucht und ggf. angepasst werden. Hier ist zu erwähnen, dass der Zeitbedarfswert auch eine Eingangsgröße für mikroskopische Simulationen ist. Die Untersuchung eines einzelnen Knotenpunkts in Anhang 9.4 zeigt, dass bei den gewählten Annahmen eine Steigerung der Sättigungsverkehrsstärke mit höheren AVF-Durchdringungsgrade erzielt werden kann.

Aus der angepassten Berechnung der Sättigungsverkehrsstärke folgt inhärent auch die Berücksichtigung von AVF bei der Berechnung der Kapazitäten bei unbehindertem Abfluss, sowie der Kapazität der Links- und Rechtsabbieger bei bedingt verträglichem Abfluss (Gleichung S4-9 und S-4-19). Zusätzlich müssen die dafür verwendeten Bilder S4-8 und S4-9 angepasst werden. Die notwendige Anpassung folgt daraus, dass gerade das Durchsetzen von AVF durch andere Ströme, wie es beim Linksabbiegen der Fall ist, substantiell unterschiedlich zu menschlichen Fahrern sein kann. Dadurch werden die entsprechenden Kapazitäten potentiell beeinflusst. Gleiches gilt auch für Rechtsabbieger in Konflikt mit Fußgänger- und Fahrradströmen. Auch die Kapazität von Mischfahrstreifen könnte sich dank Kommunikation und Kooperation der AVF ändern und müsste daher neu untersucht werden. Die Kapazität von Fahrstreifen mit zusätzlichem kurzen Aufstellstreifen würde ebenso neu untersucht werden müssen, und ggf. Bild S4-14. Auf Basis der Anpassung der Kapazität ändern sich ebenso die Auslastungsgrade und daher die Wartezeit mit der Grundwartezeit  $t_{w,G}$  und der Rückstauwartezeit  $t_{w,R}$ , welche durch

die Gleichungen S4-42, S4-43 und S4-44 genauer definiert ist. Etwaige empirisch ermittelte Anteile in den Gleichungen dieses Abschnitts müssten neu untersucht und ggf. untersucht werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Kolonnenbildung und die Wartezeit bei koordinierten Verkehrsströmen, da dies auf Basis der Kommunikation und Kooperation von AVF untereinander und mit der Infrastruktur potentiell verbessert werden kann. Dies betrifft vor allem den Parameter  $R_p$  in Gleichung S4-54 und somit auch Bild S4-16. Das in Gleichung (S4-67) vorkommende Koordinierungsmaß  $k_i$  könnte sich dank besserer Kommunikation und Kooperation von AVF mit der Infrastruktur ebenso erhöhen. Die Rückstaulängen, die für die verschiedensten Fälle berechnet werden, basieren auf zu ermittelten Größen und berücksichtigen daher etwaige AVF-Effekte automatisch. Hier ist zu erwähnen, dass das untersuchte visionäre Szenario erste Hinweise auf eine Entwicklung besserer Koordination von Fahrzeugströmen und Lichtsignalanlagen liefert. Durch die dynamische Anpassung der Freigabe- und Umlaufzeiten auf Basis von Fahrzeugpositionen kann der streckenzugsweite Verkehrsablauf maßgeblich verbessert werden.

#### **6.4.1.2.4. Verkehrsqualität an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage**

Im Kapitel S5 „Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage“ werden die Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität von Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage bei einer erwarteten Verkehrsnachfrage beschrieben. Dies schließt Einmündungen und Kreuzungen mit Vorfahrtbeschilderung, Kreisverkehre mit Vorfahrtbeschilderung und Einmündungen/Kreuzungen mit der Regelung „rechts vor links“ als Betriebsformen ein. Solche Knotenpunkte wurden im Zuge der Simulationsstudie zwar nicht isoliert betrachtet, sind aber in den betrachteten Streckenzügen enthalten und daher implizit berücksichtigt.

Die Qualität des Verkehrsablaufs wird über Grenzwerte der mittleren Wartezeit bestimmt. Da jene in AVF verschieden wahrgenommen werden könnte, müsste der Zusammenhang der Qualität und der mittleren Wartezeit beim Aufkommen von AVF neu bewertet werden. Ein wesentlicher Punkt für diesen Abschnitt sind die Grenz- und Folgezeitlücken. Diese werden in den Tabellen S5-3 und S5-5 dargestellt, die das mittlere Verhalten der Fahrzeuglenker abbildet, welches an zahlreichen Knotenpunkten in Deutschland über mehrere Jahre hinweg beobachtet worden ist. Da Grenz- und Folgezeitlücken wesentlich vom Fahrverhalten der Fahrzeuge abhängen, müssen diese bei AVF im Verkehrsfluss neu untersucht werden. Neben den Tabellen müssen auch die Bilder angepasst werden, welche zur Bestimmung der Grundkapazitäten herangezogen werden können (Bild S5-2, Bild S5-9, Bild S5-10, Bild S5-17, Bild S5-18, Bild S5-19, Bild

S5-23). Da auch mögliche Interaktionen mit Fußgängern und Radfahrern über den Abminderungsfaktor  $f_{f,EK,j}$  berücksichtigt werden und diese Interaktionen speziell mit AVF noch ungeklärt sind, müssen Bild S5-3 und Bild S5-11 angepasst werden. Selbiges gilt für den Fall von Kreisverkehren, also dem Faktor  $f_{f,Kreis}$  und die Bilder S5-20 und S5-21. Des Weiteren fließen die Wahrscheinlichkeiten für staufreie Zustände ein. Diese sind von der Verkehrsdynamik sowie von möglicher Kooperation und Kommunikation von AVF abhängig und müssen daher ebenso angepasst werden. Obwohl die Berechnungen hierzu jedoch weitgehend normiert sind, ist eine Überprüfung der entsprechenden Diagramme empfehlenswert. Dies betrifft Bild S5-5, S5-7, S5-13 und S5-14. Die Bestimmung der mittleren Wartezeit für Fahrzeuge als auch für Fußgänger- und Radverkehrsströme hängt erneut von der Verkehrsdynamik ab, und wird maßgeblich durch Kommunikation und Kooperation beeinflusst werden. Daher wird zumindest eine Überprüfung der entsprechenden Bilder (S5-24, S5-29, S5-30) notwendig sein. Gleiches gilt für die Berechnung der Staulängen (Bilder S5-25 und S5-26).

#### **6.4.1.2.5. Angebotsqualität eines Netzabschnitts**

Im Kapitel S6 „Netzabschnitt“ werden in Tabelle S6-1 Stufen der Angebotsqualität eines Netzabschnitts  $SAQ_n$  in Abhängigkeit vom Fahrtgeschwindigkeitsindex eingeteilt. Diese Berechnungen könnten größtenteils beibehalten werden, da sie sich auf generell gültige physikalische Prinzipien berufen. Lediglich die Tabellen S6-2/-3/-4 könnten angepasst werden, da sich die Zuschläge für zusätzlichen Zeitverlust bei bestimmter Straßensituation ändern könnten. Zusätzlich sind die Werte für die angestrebten mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit  $V_{VS,N}$  bzw.  $V_{HS,N}$  in Abhängigkeit von der Straßenkategorie (siehe Tabelle S6-5) im Kontext von AVF zu hinterfragen, da die Reisezeit in AVF vermutlich anders wahrgenommen wird. In der durchgeführten Simulationsstudie wurden streckenzugsweite Fundamentaldiagramme berechnet, die eine entsprechende Ableitung der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit erlauben. Für die betrachteten Szenarien, wurde dabei durchwegs ein positiver Einfluss der AVF auf die Fahrgeschwindigkeit beobachtet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass einige Gleichungen und Schaubilder/Diagramme angepasst werden müssten, um das Verhalten des Verkehrs inklusive AVF entsprechend abbilden zu können. Dies betrifft vor allem jene Aspekte, denen Annahmen zum entsprechenden Fahrverhalten zugrunde liegen, oder wo Kommunikation und Kooperation einen Einfluss haben können. Es ist jedoch klar, dass der Einfluss von dem Durchdringungsgrad der AVF abhängen wird. Durch Berücksichtigung einer Vielzahl an Durchdringungsgraden würde die Komplexität der Berechnungen erheblich gesteigert werden.

### 6.4.1.3. Richtlinien für Lichtsignalanlagen

Im folgenden Abschnitt werden die RiLSA auf Parameter und Variablen untersucht, die bei Einführung von AVF eventuell angepasst werden müssten. Die Richtlinie behandelt unter anderem die Entwicklung von Festzeitsteuerungsprogrammen. Inwiefern diese in einer Zukunft mit AVF noch eine große Rolle spielen werden ist ungewiss, da auf Basis der erweiterten Datensätze (z.B.: *Floating Car-Daten*) vermehrt adaptive Steuerungsformen eingesetzt werden könnten. Es wird daher kein spezieller Fokus auf holistische Steuerungsprogramme gelegt, sondern vielmehr auf die auftretenden Bestandteile und Randbedingungen eingegangen.

Der Abschnitt 2.4 der RiLSA beschreibt die Übergangszeiten, die vom Wechsel der Freigabezeit zur Sperrzeit durch das Übergangssignal GELB vor ROT angezeigt werden, sowie jene des Signals ROT/GELB vor GRÜN. Laut Aussagen von Fachleuten könnten die Übergangszeiten bei 100-prozentigen AVF-Verkehr stark reduziert werden, da die Wechsel nicht über Lichtzeichen signalisiert werden müssen und die Kommunikation per Übertragung entsprechender Nachrichten laufen könnte. Bei geringeren Durchdringungsgraden würden die Übergangszeiten vermutlich nicht geändert werden. Einer der wichtigsten Aspekte ist die Bestimmung der Zwischenzeiten in Abschnitt 2.5 der RiLSA. Für die Bestimmung sind die Überfahrzeiten, Räumzeiten und Einfahrzeiten wichtig. Bei einer sehr konservativen Fahrweise der AVF könnten diese Zeiten sogar erhöht werden müssen. Wahrscheinlich könnte eine entsprechende Anpassung wieder vom zu erwartenden Durchdringungsgrad abhängen. Bei vollständiger Marktdurchdringung könnten die für das manuelle Fahren enthaltenen Sicherheitsmargen reduziert und nur einbezogen werden, wenn sich tatsächlich ein Fahrzeug im entsprechenden Bereich befindet. Gleiches gilt für die Mindestsperrzeit und Mindestfreigabezeit. Die Umlaufzeiten hängen direkt von den Sättigungsverkehrsstärken ab, welche eine Eingangsgröße ist, die mit dem HBS bestimmt werden kann. Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben kann jene sehr wohl von AVF beeinflusst werden. Dementsprechend würden sich auch die Umlaufzeiten ändern. Gleiches gilt für die Freigabezeit.

Im Abschnitt 4 der RiLSA werden Steuerungsverfahren beschrieben. Hier sind insbesondere verkehrsabhängige Programme interessant, da beispielsweise die Erfassung und Verarbeitung von Kenngrößen aufgrund der verbesserten Datenlage dank V2X optimiert werden kann. Als konkretes Beispiel wurde im Projekt das visionäre Szenario untersucht, bei welchem das Potenzial einer flexiblen Steuerung für die Leistungsfähigkeit unter-

sucht wurde. Zusätzlich können in Zukunft kritische Staubereiche in Knotenpunktzufahrten anstatt durch Messung von Stau und Staulänge mit Hilfe von Detektoren auf Basis der dynamischen Fahrzeugdaten kontrolliert werden. Die dynamische und damit verbesserte Rückstauerkennung kann die Messung mittels stationärer Schleifendetektoren in Zukunft obsolet machen. In den Simulationsszenarien wurde veranschaulicht, dass die Rückstaulängen auf einzelne Meter genau gemessen werden können. Dies könnte in Zukunft Realität werden, wenn die entsprechenden Daten bei signifikanten Durchdringungsgraden von AVF übermittelt werden. Die Bemessung von Steuerungsverfahren kann anhand einer verbesserten Rückstaulängenangabe stark verfeinert werden. Des Weiteren wird die Koordinierung von mehreren Signalgruppen zu besseren Ergebnissen führen können, da Pulks genauer erkannt werden können.

In den bisherigen RiLSA wird demnach weniger an Gleichungen und Bildern angepasst werden, sondern viel mehr können gesamte Textpassagen für AVF hinzugefügt werden. Wenn entsprechende Standards für die Kommunikation und Kooperation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur existieren, können darauf basierend Signalsteuerungsprogramme entworfen werden oder zumindest bestimmte Grenzwerte und Kenngrößen festgelegt werden.

#### 6.4.1.4. Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation: Grundlagen und Anwendung

Die Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation hatten bisher noch keinen Richtliniencharakter und waren daher als Wissenspapier niedriger gestuft als das HBS oder die RiLSA. Aufgrund der in der Realität vorherrschenden und immer höher werdenden Komplexität im Straßenverkehr könnte sich dies in Zukunft jedoch ändern. Zum Beispiel könnten Parametersätze zur Modellierung von AVF vorgeschlagen werden, sobald entsprechende empirische Daten vorliegend sind. Eine entsprechende Kalibrierung kann dann erfolgen, beispielsweise wie in Abschnitt 4.7 des vorliegenden Berichts beschrieben wurde.

Für die Modellierung des strategischen Fahrerverhaltens wird in Abschnitt 3.2.4 des Hinweisepapiers auf den zufallsgesteuerten Entscheidungsprozess der Fahrer eingegangen. Bei AVF entscheidet nicht der Zufall über eine Wegentscheidung, denn diese hängt von diversen technischen Parametern ab. Auch die in Abschnitt 3.3 des Hinweisepapiers zum Thema der Zufälligkeit der Abstandsentscheidung der Fahrer, das heißt, wann ein Bremsvorgang vor einem stehenden Objekt eingeleitet werden würde, wäre für AVF

nicht bei jedem Einzelfall verschieden, da sie Distanzen durch Sensoren erfassen und nach einer bestimmten Länge zum Stehen kommen. Das heißt, dass gewisse Zufallsaspekte wegfallen bzw. stark reduziert werden würden und dies auch in der entsprechenden Modellierung dargestellt werden sollte.

Zudem wäre es von großem Nutzen, im Anhang 1 des Hinweisdokuments standardisierte Modelle für AVF vorzuschlagen. Generell wäre auch die Nennung von standardisierten Parametersätzen vorteilhaft. Dies würde für eine Vergleichbarkeit allgemeiner Simulationsstudien sorgen, sowie die Anwendung der Modelle ermöglichen, für den Fall, dass keine geeigneten Datensätze vorlägen.

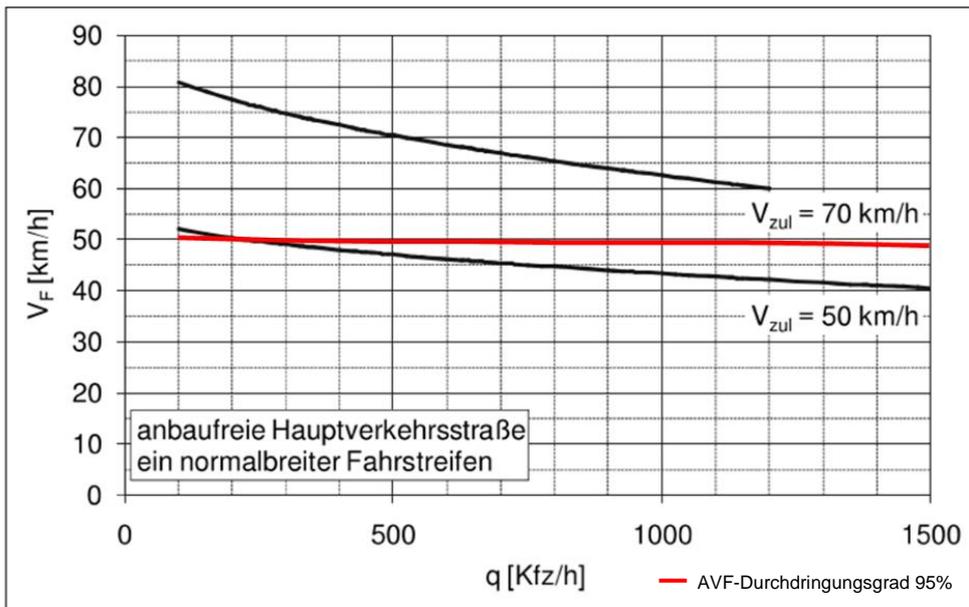
### **6.4.2. Beispiel: Anbaufreie Hauptverkehrsstraße**

In diesem Abschnitt soll anhand eines Beispiels gezeigt werden, wie die Regelwerke angepasst werden könnten, um den Einfluss von AVF auf den Verkehrsablauf darzustellen. Im Folgenden wird auf das Geschwindigkeit-Fluss-Diagramm eingegangen, da im Zuge des Projekts ein starker Fokus auf das Fundamentaldiagramm gelegt wurde. Diese werden im dritten Kapitel des HBS zur Bewertung der Verkehrsqualität von Strecken verwendet.

Zuerst wird gezeigt, wie der entsprechende Abschnitt im HBS selbst angepasst werden kann. Dann wird anhand eines Rechenbeispiels dargestellt, wie ein entsprechendes Diagramm verwendet werden könnte. An dieser Stelle sei erneut darauf hingewiesen, dass für eine entsprechende Anpassung eine fundierte empirische Datengrundlage vonnöten ist.

#### **6.4.2.1. Angepasste Fundamentaldiagramme mit berechneten Korrekturfaktoren**

Um die Geschwindigkeit-Fluss-Diagramme für AVF anzupassen, wird der im Projekt vorgestellte Ansatz der Korrekturfaktoren verwendet und das Nomogramm entsprechend angepasst. Dafür wird für die in Abschnitt 4.7 simulierte Strecke zusätzlich ein Szenario mit 95 % AVF im Verkehrsfluss gerechnet. Dieser Durchdringungsgrad entspricht dabei nahe an jenem des visionären Szenarios. In Abbildung 28 stellt die rote Kurve die entsprechenden Ergebnisse dar.



**Bild S3-1:** Mittlere Fahrtgeschwindigkeit  $V_F$  für Teilstrecken einer anbaufreien Hauptverkehrsstraße mit einem normalbreiten Fahrstreifen in der betrachteten Richtung

Abbildung 28: Angepasstes Geschwindigkeit-Fluss-Diagramm

Der zugehörige Text könnte wie folgt lauten:

*Die mittlere Fahrtgeschwindigkeit  $V_F$  auf Teilstrecken von anbaufreien Hauptverkehrsstraßen wird nach Bild S3-1 [...] ermittelt. Dabei wird nach dem Fahrbahnquerschnitt, der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und dem Durchdringungsgrad von automatisierten und vernetzten Fahrzeugen differenziert.*

Durch die Ermittlung von  $V_F$  über das angepasste Diagramm kann dann mittels Gleichung S3-1 im HBS die Verkehrsdichte bestimmt werden und schlussendlich die Verkehrsqualität. Dies ist anhand eines Rechenbeispiels im folgenden Abschnitt gezeigt.

#### 6.4.2.2. Rechenbeispiel

In diesem Rechenbeispiel wird sich auf das Beispiel S3-2 „Anbaufreie Hauptverkehrsstraße im Vorfeld bebauter Gebiete mit einem normalbreiten Fahrstreifen“ der HBS Beispielsammlung als Grundlage bezogen. Die wichtigsten Textbausteine werden hier wiedergegeben und ggf. um die AVF-spezifischen Aspekte ergänzt. Das Beispiel wird im Vergleich zum Original aus der HBS Beispielsammlung etwas vereinfacht dargestellt.

*Für eine 1300 m lange Strecke einer anbaufreien Hauptverkehrsstraße zwischen zwei Hauptknotenpunkten, die auf Grund ihrer Verkehrsfunktion im Netz als Kategorie VS II*

nach den RIN (2008) eingestuft ist, sollen die Qualität des Verkehrsablaufs und die mittlere Fahrtgeschwindigkeit ermittelt werden.

Im Rahmen der Prognose der Verkehrsnachfrage wurde für die zu erwartende Bemessungsverkehrsstärke auf dem ersten Teil der betrachteten Strecke in Richtung 1 ein Wert von 900 Kfz/h ermittelt. Der bemessungsrelevante Schwerverkehrsanteil bleibt unter 10 %. **Der erwartete Durchdringungsgrad von automatisierten und vernetzten Fahrzeugen beträgt 95 %.**

Für die Richtung 1 soll geprüft werden, ob eine Qualität des Verkehrsablaufs der Stufe D erreicht wird.

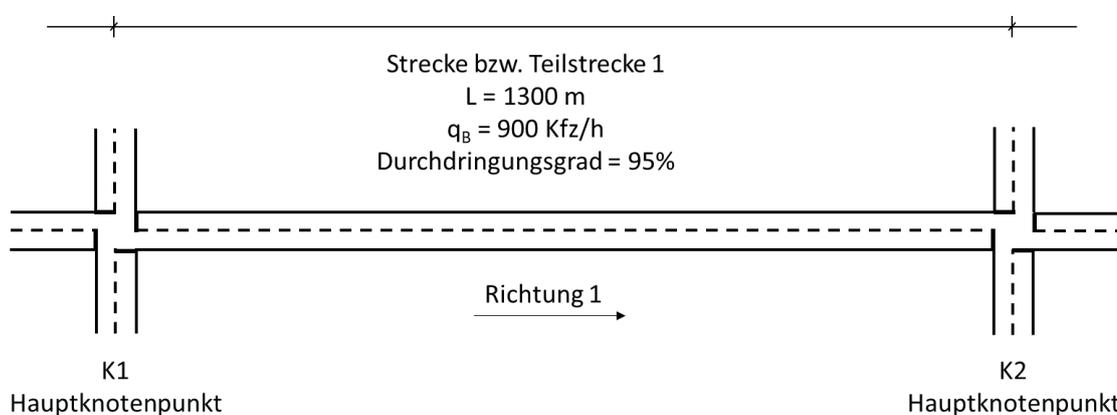


Abbildung 29: Strecke bzw. Teilstrecke und Einflussgrößen im angepassten Beispiel

Verfahren:

Die Länge einer Strecke ergibt sich aus dem Abstand der beiden benachbarten Hauptknotenpunkte. Bezugspunkte zur Ermittlung der Streckenlänge sind die Knotenpunktmitten. In der so gebildeten Strecke sind die Knotenpunktbereiche enthalten. Strecken werden an Stellen in Teilstrecken unterteilt, an denen sich eine relevante Einflussgröße erheblich ändert. Bei anbaufreien Hauptverkehrsstraßen ist dies der Fall bei Änderungen

- des Fahrbahnquerschnitts,
- der Verkehrsstärke,
- **des Durchdringungsgrads von automatisierten und vernetzten Fahrzeugen,**
- der Erschließungsintensität.

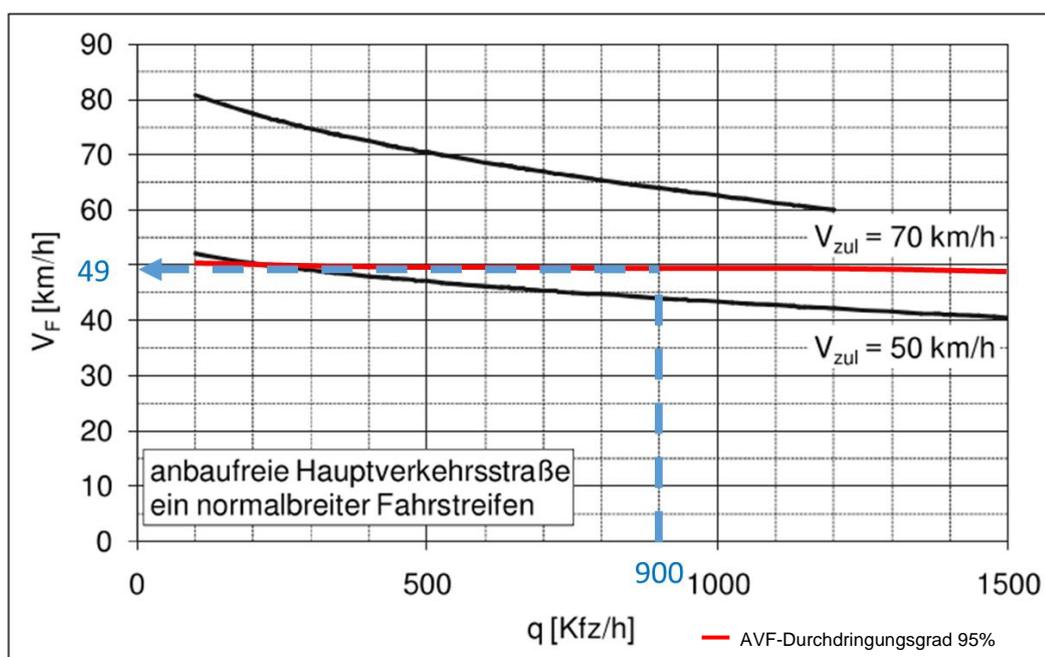
[...] Eine Unterteilung in Teilstrecke auf Grund eines Wechsels im Fahrbahnquerschnitt sowie der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ist nicht erforderlich. [...] Daher wird die betrachtete Strecke nicht in mehrere Teilstrecken unterteilt (Abbildung 29). [...] Das Verfahren nach Kapitel S3 ist somit anwendbar.

Angepasstes Formblatt S3: Verkehrsqualität und mittlere Fahrtgeschwindigkeit auf einer Strecke				
Strecke: Beispiel S3-1				
Teilstrecke i:				1
Grundlagen	1	Straßenkategorie gemäß den RIN (2008)		VS II
	2	angestrebte Qualitätsstufe QSV		D
	3	betrachtete Richtung		Richtung 1
	4	Länge der Strecke	[m]	1300
	5	Länge der Teilstrecke $L_i$	[m]	1300
	6	Anzahl und Art der Fahrstreifen		1n
	7	zulässige Höchstgeschwindigkeit $V_{zul,i}$	[km/h]	50
	8	Erwarteter Durchdringungsgrad von AVF	[%]	95
	9	Erschließungsintensität (bei angebauten Hauptverkehrsstraßen)		--
	10	Bemessungsverkehrsstärke $q_{B,i}$	[Kfz/h]	900
Verkehrsqualität und Fahrtgeschwindigkeit	11	mittlere Fahrtgeschwindigkeit $V_{F,i}$	[km/h]	49
	12	Berücksichtigung der Aufteilung der Verkehrsdichte $f_{FS,i}$	[-]	1
	13	fiktive fahrstreifenbezogene Verkehrsdichte $k_{FS,i}$	[Kfz/km]	18,4
	14	Qualitätsstufe der Teilstrecke i QSV <sub>i</sub>		C
	15	mittlere fahrstreifenbezogene Verkehrsdichte auf der Strecke $k_{FS}$	[Kfz/km]	18,4
	16	Qualitätsstufe der Strecke QSV		C
	17	mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf der Strecke $V_F$	[km/h]	49

Abbildung 30: Angepasstes Formblatt S3

Die Straßenkategorie (Zeile 1), die angestrebte Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs (Zeile 2) und die betrachtete Richtung (Zeile 3) werden als Grundlagen in das **angepasste** Formblatt S-3 eingetragen. Die Länge der Strecke wird in Zeile 4 eingetragen. Die Länge jeder Teilstrecke wird in Zeile 5 eingetragen. Die Anzahl und Art der Fahrstreifen wird in Zeile 6 eingetragen. [...] Die zulässige Höchstgeschwindigkeit jeder Teilstrecke wird in Zeile 7 eingetragen. **Der zu erwartende Durchdringungsgrad von automatisierten und vernetzten Fahrzeugen wird in Zeile 8 eingetragen.** Die Erschließungsintensität wird in Zeile 9 eingetragen. Anbaufreie Hauptverkehrsstraßen haben

keine Erschließungsfunktion, daher erfolgt kein Eintrag. Die Bemessungsverkehrsstärke ist nach Kapitel S2 zu bestimmen und wird in Zeile 10 eingetragen. Für jede Teilstrecke wird mit den in Abbildung 31 dargestellten  $q$ - $V$ -Beziehungen für die Bemessungsverkehrsstärke (Zeile 10) als Eingangsgröße die mittlere Fahrtgeschwindigkeit (Zeile 11) ermittelt. Für Teilstrecke 2 ergibt sich diese zu:



**Bild S3-1:** Mittlere Fahrtgeschwindigkeit  $V_F$  für Teilstrecken einer anbaufreien Hauptverkehrsstraße mit einem normalbreiten Fahrstreifen in der betrachteten Richtung

Abbildung 31: Für einen AVF-Durchdringungsgrad von 95 % angepasstes Bild S3-1 aus dem HBS

Zur Berücksichtigung der fahrstreifenbezogenen Verkehrsdichte auf einer Teilstrecke ist in Abhängigkeit von der Anzahl und Art der Fahrstreifen (Zeile 6) mit Tabelle S3-2 der Faktor  $f_{FS}$  (Zeile 12) zu bestimmen. Für die Teilstrecke 1 (anbaufrei, ein normalbreiter Fahrstreifen) beträgt der Faktor 1,0.

Die fiktive fahrstreifenbezogene Verkehrsdichte auf einer Teilstrecke (Zeile 13) wird mit Gleichung (S3-1) unter Berücksichtigung der Bemessungsverkehrsstärke (Zeile 10), der mittleren Fahrtgeschwindigkeit (Zeile 11) und dem Faktor  $f_{FS}$  zur Berücksichtigung der Verteilung der Verkehrsdichte (Zeile 12) ermittelt. Für Teilstrecke 1 ergibt sich die fahrstreifenbezogene Verkehrsdichte zu:

$$f_{FS,i} = \frac{900}{49} * 1,0 = 18,4 \text{ Kfz/km}$$

Die zugehörige Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs jeder Teilstrecke wird mit Tabelle S3-1 bestimmt und in Zeile 14 eingetragen. Die mittlere fahrstreifenbezogene Verkehrsdichte auf der gesamten Strecke (Zeile 15) ergibt sich nach Gleichung (S3-2) mit den Längen der Teilstrecken (Zeile 5) gewichtet aus den fiktiven fahrstreifenbezogenen Verkehrsdichten auf den einzelnen Teilstrecken (Zeile 13) zu:

$$k_{FS} = \frac{18,4 * 1300}{1300} = 18,4 \text{ Kfz/km}$$

Die zugehörige Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs der gesamten Strecke wird nach Tabelle S3-1 bestimmt – als maßgebend sind hierbei die Grenzwerte für  $V_{zul} = 50 \text{ km/h}$  anzusetzen – und in Zeile 16 eingetragen.

Ergebnis: Die angestrebte Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs wird eingehalten. Zur Bewertung der Angebotsqualität auf Netzabschnitten gemäß Kapitel S6 ist außerdem die Kenntnis der mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit  $V_F$  auf der gesamten Strecke (Zeile 17) erforderlich. Diese wird mit den Längen der Teilstrecken (Zeile 4) gewichtet aus den mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten auf den einzelnen Teilstrecken (Zeile 11) mit Gleichung S3-3) bestimmt:

$$V_F = \frac{49}{\frac{1300}{49}} = 49 \text{ km/h}$$

Dieses für den Fall von AVF im Verkehrsfluss adaptierte Beispiel zeigt anschaulich, wie entsprechende Korrekturfaktoren in der Praxis angewendet werden könnten. Dabei wird klar, dass die Anwendung von Korrekturfaktoren durchaus praktikabel sein kann, um eine erste grobe Abschätzung der Effekte von AVF auf den Verkehrsablauf und dessen Qualität zu erhalten.

## 6.5. Handlungsempfehlungen für Forschung und Praxis

In diesem Abschnitt werden die Einschätzungen und Bewertungen aus den vorigen Abschnitten synthetisiert und entsprechende Handlungsempfehlungen für Forschung und Praxis im Kontext des AVF entwickelt.

### 6.5.1. Forschung

Die Automatisierung und Vernetzung des Verkehrs ist seit einigen Jahren eines der prominenten Themen der Straßenverkehrsforschung. Dies gilt auch für die internationale

Fachwelt, die eine große Anzahl an Publikationen zur Modellierung von AVF sowie zu den Wirkungen solcher auf das Verkehrsgeschehen produziert hat. Der Schwerpunkt lag bislang in der Grundlagenforschung. Auf dieser Forschungsebene scheint mittlerweile das Untersuchungspotential zunehmend ausgeschöpft zu sein.

In Bezug auf Praxisrelevanz wurden für urbane Straßennetze im vorliegenden F+E-Vorhaben wichtige Ergebnisse erzielt und Erkenntnisse für einen zukünftigen urbanen Verkehr mit AVF abgeleitet. Um weitere, vor allem praxisnähere, Erkenntnisse zu erlangen müssen die folgenden Punkte beachtet werden:

- *Empirische Daten:* Die Simulation von AVF kann helfen, generell mögliche Einflüsse auf den Verkehrsablauf zu verstehen. Zusätzlich können dezidierte Szenarien untersucht werden, wobei hier die Annahmen zur Modellierung des Fahrverhaltens im Vordergrund stehen. Gerade letztere treten immer mehr in den Fokus, da die Bandbreite der möglichen Entwicklungen groß ist und der Einfluss der Annahmen eine entsprechende Rolle einnimmt. Für spezifische Aussagen zur zukünftigen Entwicklung unter gegebenen Randbedingungen müssen die getroffenen Annahmen daher verifiziert werden. Dies kann jedoch nur basierend auf empirischer Daten erfolgen. D.h., es müssen AVF im Umfeld beobachtet werden, für das ein Modell erstellt werden soll. Zum Beispiel müssten AVF in städtischen Streckenzügen untersucht werden, in dem ihr Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselverhalten genau aufgezeichnet wird. Zusätzlich müsste das Fahrverhalten der anderen Verkehrsteilnehmer in diesem Kontext beobachtet werden. Mit den AVF-spezifischen Daten könnten die entsprechenden Simulationsmodelle dann kalibriert werden und eine höhere Aussagekraft auf Basis der Modelle hergestellt werden. Es ist offensichtlich, dass solche Daten erst dann erhoben werden können, wenn erste Fahrzeuge im offenen Straßenraum verkehren.
- *Simulatoren und Testfelder:* Ein weiterer Zwischenschritt bevor AVF im öffentlichen Straßenraum zugelassen werden, können der Einsatz von Simulatoren und der Betrieb von Testfeldern im Zuge von Forschungsprojekten sein. Obwohl hier die Beobachtungen durch gewisse Einflüsse der Testumgebung (geschützter Raum, bedingte Immersion) verfälscht werden, können jedoch weitere Erkenntnisse gewonnen werden, die in verfeinerte Modelle für das Fahrverhalten von Verkehrsteilnehmern im Mischverkehr münden können. Es wird daher empfohlen, die vorherrschenden Forschungsprojekte auf diesem Gebiet zu unterstützen und weitere Projekte zu dieser Thematik zu fördern.

- *Einbindung von Automobilherstellern:* Aus wissenschaftlicher Perspektive wäre es der nächste logische Schritt, wenn Automobilhersteller ihre Algorithmen zur Steuerung der AVF teilen würden, da diese direkt in Simulationsmodelle eingepflegt werden könnten. Es ist jedoch verständlich, dass dieses Vorgehen in der Realität nicht sehr attraktiv für die entsprechenden Akteure ist. Dennoch sollte eine entsprechende Zusammenarbeit zwischen Automobilherstellern und unabhängigen wissenschaftlichen Institutionen gefördert werden, um die Erstellung und Kalibrierung geeigneter Fahrverhaltensmodelle zu ermöglichen. So könnten die Modelle von Konzerningenieuren vor Ort kalibriert und erst dann weitergegeben werden. Durch dieses Vorgehen könnte die Herausgabe von Betriebsgeheimnissen und vertraulichen Datensätzen vermieden werden, aber die kalibrierten Modelle könnten dank echter Rohdaten an Qualität gewinnen. Es wird empfohlen, entsprechende Kollaboration zu fördern.
- *Zulässige Betriebsbereiche:* Zusätzlich sei erwähnt, dass das Thema der zulässigen Betriebsbereiche (engl.: *Operational Design Domain*, ODD) noch nicht abschließend geklärt ist. Als zulässigen Betriebsbereich beschreibt man den spezifischen Bereich, in denen ein automatisiertes Fahrsystem ordnungsgemäß funktionieren soll, einschließlich Straßenarten, Geschwindigkeitsbereiche, Wetter, Tageszeit und Umweltbedingungen. Es besteht laut Fachleuten noch Bedarf die zulässigen Betriebsbereiche genau zu definieren, in welchen AVF verkehren dürfen. Dies kann helfen, spezifische Situationen auszuarbeiten, unter welchen ein AVF ein gewisses Sicherheitslevel garantieren kann und wann es die Steuerung an den menschlichen Fahrzeuginsassen abgeben muss. Dies betrifft natürlich nicht den höchsten Automatisierungsgrad (Stufe 5: Fahrerloses Fahren), in welchen solche Bereiche per Definition nicht mehr notwendig sind.
- *Kommunikation und Kooperation:* Sowohl die Literaturrecherche als auch die Befragung der Fachleute förderten zutage, dass das größte Potential in der Vernetzung der Fahrzeuge und der Infrastruktur liegt. Laut Aussagen von Fachleuten liegt der verkehrliche Nutzen vor allem in der Steigerung der Verkehrssicherheit und der Verkehrseffizienz. Dies wurde unter anderem im visionären Szenario des Projekts abgebildet, welches eine solche Vernetzung impliziert. Hier besteht jedoch Bedarf, die technischen Aspekte weiter zu untersuchen. Ein zusätzlicher relevanter Aspekt ist jener des Fehlerfalls, d.h., in Zukunft sollte die Möglichkeit des technischen Versagens einzelner Teilsysteme sowie dessen Auswirkung auf das Verkehrsgeschehen untersucht werden. Es muss geklärt werden, welche

Redundanzen bestehen müssen, damit ein System entwickelt werden kann, welches die versprochenen Effizienzgewinne garantiert liefern kann.

### 6.5.2. Praxis

Auch für die Praxis lassen sich auf Basis der Projektergebnisse Handlungsempfehlungen beschreiben. Die Automatisierung und Vernetzung des Straßenverkehrs ist ein Vorhaben von äußerst hoher Komplexität. Die verwendeten Algorithmen für die Steuerung der Fahrzeuge sind nach wie vor in Entwicklung und nur wenige Fahrzeuge sind bereits mit automatisierten Funktionen im Einsatz – wenn, dann meist in Pilotstudien. Dies gilt vor allem für Fahrzeuge mit Automatisierungsgrad 4 oder 5. Umso schwieriger ist es, die Auswirkungen dieser Fahrzeuge auf Kenngrößen des Verkehrsablaufs abzuschätzen, entsprechende Verfahren zu entwickeln und in Regelwerken wie etwa dem HBS bereitzustellen. Zwei sinnvolle Wege scheinen erstens das Thema im FGSV-Papier „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ zu behandeln und zweitens für stark vereinfachte Fälle (z.B. ein generischer Streckenzug) eine Änderung der möglichen Verkehrsstärken und Sättigungsflüsse in Abhängigkeit des Durchdringungsgrades anhand von Korrekturfaktoren zu modellieren. Es wird dabei betont, dass beide Wege implizit die Verfügbarkeit von empirischen Daten zu AVF im Verkehrsfluss bedingen.

- *Simulation:* Die zahlreichen im Rahmen der Grundlagenforschung entwickelten Modelle für das Fahrverhalten von AVF haben zu unterschiedlichen Ergebnissen und Interpretationen des Verkehrsablaufs mit AVF geführt. Umso dringender wird daher empfohlen, die geeignetsten Modellansätze inklusive der Standardparametersätze zu identifizieren und bereitzustellen (z.B. durch Beschreibung im FGSV Dokument „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“). Durch eine zusätzliche Aufstufung dieses Dokuments in den Rang eines Regelwerks könnte eine Verwendung einer bestimmten Modellgruppe gefördert werden.
- *Korrekturfaktoren:* Falls nur übergeordnete Aussagen getroffen werden sollen, könnte der Einfluss von AVF mittels Korrekturfaktoren dargestellt werden. Dies könnte sich zum Beispiel auf einen nicht spezifisch räumlich verorteten Streckenzug bzw. auf ein allgemeines Nachfragemuster beziehen. Dies wurde im Projekt beispielhaft für verschiedenste Szenarien durchgespielt. Zusätzlich wurde ein Rechenbeispiel für die Bewertung der Verkehrsqualität auf städtischen Strecken dargestellt. Des Weiteren wurde von ähnlichen Verfahren für den Autobahnver-

kehr im amerikanischen *Highway Capacity Manual* berichtet. Es wird daher geschlossen, dass es für diesen Ansatz in der Fachszene eine höhere Akzeptanz gibt. Bei entsprechender empirischer Datenlage können also solche Faktoren erhoben werden und in das HBS eingepflegt werden. Die methodische Machbarkeit dieser Herangehensweise wurde im Projekt nachgewiesen.

## 7. Zusammenfassung

### 7.1. Zielsetzung

Die im Projekt festgesetzten Ziele umfassten eine umfangreiche Literaturrecherche zu den vermuteten Auswirkungen von AVF auf wichtige verkehrliche Kenngrößen und deren Modellierung in Verkehrsflusssimulationen. Zudem sollten auf Basis dieser Recherche und der Erfahrungen des Forschungsnehmers Zukunftsszenarien definiert werden, welche im Nachgang mit eben jener Modelle in einer Simulationsstudie für repräsentative Streckenzüge untersucht wurden. Auf Basis der Simulationsergebnisse sowie von Fachpersonbefragungen wurde der generelle Zusammenhang von Automatisierung und Leistungsfähigkeit städtischer Straßeninfrastruktur untersucht und diskutiert. Zudem wurde aufgezeigt, wie dieser Zusammenhang in Zukunft in die relevanten Regelwerke der FGSV einfließen kann. Abschließend wurden Handlungsempfehlungen für Forschung und Praxis beschrieben. Diese sollen einerseits aufzeigen, welche nächsten Schritte zu unternehmen sind, um den Wissensstand praxisorientiert auszubauen, und andererseits wie in der Praxis mit der Modellierung der AVF im Kontext des Verkehrsablaufs umgegangen werden kann. Die Ergebnisse des Projekts sind kompakt in Anhang 9.6 als Katalog aufgeführt.

### 7.2. Vorgehensweise

Das F+E-Projekt bestand aus drei inhaltlichen Arbeitspaketen, welche im vorliegenden Bericht in entsprechenden Kapiteln beschrieben wurden. Im ersten Arbeitspaket (vgl. Kapitel 3), in dem Grundlagen zu AVF zusammengetragen und im Hinblick auf die Forschungsaufgabe analysiert und bewertet wurden, wurde zuerst zu den Eigenschaften von AVF recherchiert. Dies war die Grundlage dafür, um in weiterer Folge einen geeigneten Modellansatz zu wählen, welcher im Zuge des Projekts verwendet wurde. Dann wurden die Wirkungen von AVF auf Verkehrssysteme untersucht. Hierbei konnte auf die publizierten Ergebnisse der aktiven internationalen Forschungsgemeinschaft zurückgegriffen werden. Abschließend wurden Zukunftsszenarien für den AVF im urbanen Raum definiert, die in einer Verkehrsflusssimulation untersucht werden sollten.

Im zweiten Arbeitspaket (vgl. Kapitel 4) lag der Fokus auf den simulationsbasierten verkehrstechnischen Berechnungen. Dabei wurden Szenarien für realistische städtische Straßeninfrastruktur untersucht. Die Ergebnisse wurden in Bezug zu einschlägigen Regelwerken zur Verkehrsablaufbewertung und Verkehrssteuerung gesetzt. Dafür wurden

in einem ersten Schritt vier Streckenzüge identifiziert, welche den urbanen Straßenraum einerseits in seiner Variabilität und Komplexität ausreichend abbilden, andererseits aber der Funktion großer Streckenzüge für die netzweiten Kapazitäten Rechnung tragen. Diese Streckenzüge und einzelne Knotenpunkte wurden dann mittels der Simulationssoftware SUMO für die vorab spezifizierten Zukunftsszenarien simuliert. Die Modellierung des Fahrverhaltens basiert auf den zuvor durchgeführten Recherchen. Der wichtigste untersuchte Indikator ist das Fundamentaldiagramm, da jenes eine essentielle Eingangsgröße im HBS darstellt, und somit weitreichende Auswirkungen auf die Dimensionierung von Straßenverkehrsanlagen hat. Zudem ist es ein weit verbreitetes Analysetool, da es durchschnittliche Geschwindigkeiten für verschiedene Verkehrszustände und die Kapazität des Streckenzugs ableiten lässt.

Im dritten Arbeitspaket (vgl. Kapitel 5 und 6) wurden die Simulationsergebnisse interpretiert. Es wurden zudem Befragungen von Fachleuten zur Vorgehensweise sowie den Resultaten der Simulationsstudie, sowie zu generellen Entwicklungen im Kontext von AVF durchgeführt. Diese Fachleute wurden dabei aus einschlägigen FGSV-Gremien rekrutiert. Schließlich wurden die relevanten FGSV Schriften systematisch im Kontext von AVF analysiert und beispielhaft aufgezeigt, wie der Einfluss solcher Fahrzeuge inhaltlich eingebracht werden könnte. Schlussendlich wurden sowohl aus den Ergebnissen der verkehrstechnischen Berechnungen als auch aus den Befragungen der Fachleute Handlungsempfehlungen abgeleitet.

### 7.3. Resultate

In der Grundlagenermittlung konnten die wichtigsten Aspekte zu AVF identifiziert werden. Dies gab Aufschluss darüber, was für deren Modellierung in Verkehrsflussmodellen essentiell zu berücksichtigen ist. Die entsprechend entwickelten Anforderungen an die Modellierung erlauben die Bewertung bestehender Modelle. Hier wurde begründet, dass mikroskopische Modelle am geeignetsten sind, um AVF und menschlich geführte Fahrzeuge im Mischverkehr im städtischen Umfeld zu beschreiben. Dies deckt sich mit ähnlichen Erkenntnissen aus der Fachliteratur. Für die Verwendung im Projekt wurde ein Modellansatz gewählt, der im Zuge eines internationalen Forschungsprojekts entwickelt und mit empirischen Daten kalibriert wurde.

Die bestehenden Forschungsergebnisse zu den Wirkungen von AVF auf Verkehrssysteme zeigen deutlich, dass diese nicht nur das gesamte Verkehrssystem, sondern auch angrenzende Systeme wie beispielsweise die Landnutzung betreffen können. Der Fokus vieler Publikationen liegt jedoch auf dem Verkehrsfluss außerorts. Die entsprechenden

Kennwerte sind meist das Fundamentaldiagramm und Streckenkapazitäten. Es gibt sowohl Studien, die eine Steigerung dieser Kennwerte vermuten, als auch jene, die von einer Reduktion ausgehen. Für innerörtliche Verkehrssysteme bestehen weniger Studien. Die meisten gehen ebenfalls eher von Steigerungen der Kapazität aus, wobei in den letzten Jahren Stimmen lauter wurden, die eine Reduktion aufgrund der aus Sicherheitsgründen notwendigen konservativen Fahrweise der AVF vermuten. Die Recherche zeigte des Weiteren, dass die bislang untersuchten Infrastrukturelemente meist nicht realistisch ausgeprägt waren und kein Bezug zu praxisrelevanten Regelwerken hergestellt wurde.

Schließlich wurden drei Zukunftsszenarien entworfen. Das Basisszenario ohne AVF dient als Referenz, um die Auswirkungen von AVF auf den städtischen Verkehrsablauf zu untersuchen. Das konservative Szenario untersucht einen vergleichsweise geringen Durchdringungsgrad (33 % AVF) ohne spezielle Verkehrsmanagementmaßnahmen. Dadurch können die kurzfristiger eintretenden Effekte der Automatisierung untersucht und quantifiziert werden. Das innovative Szenario untersucht bei höherem Durchdringungsgrad (66 % AVF) zugleich den begleitenden Einsatz von Sonderfahrstreifen für AVF. Die dadurch entstehende Separierung der Fahrzeugklassen kann zu einer Homogenisierung des Verkehrsflusses führen. Das visionäre Szenario untersucht mit *Reinforcement Learning*-Algorithmen eine neue Art Knotenpunkte zu steuern und basiert dabei auf einem sehr hohen Durchdringungsgrad von 95 %.

Diese Szenarien wurden dann für bestimmte Streckenzüge im Zuge einer Simulationsstudie untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass grundsätzlich mit einer Steigerung der Leistungsfähigkeit zu rechnen ist. Das konservative Szenario zeigt auf, dass vor allem bei höheren Nachfrageintensitäten der Vorteil durch geringere Zeitlücken zum Tragen kommt. Ein Sonderfahrstreifen für AVF, der im innovativen Szenario untersucht wurde, führt nicht ohne weiteres zu Verbesserungen der Verkehrseffizienz. Dies resultiert aus der Tatsache, dass gesonderte Fahrstreifen zu mehr Konflikten an den Knotenpunkten führen können, was wiederum zu reduzierten Verkehrsflüssen führen kann oder bei geringen Durchdringungsgraden nicht mit voller Kapazität genutzt werden. Der Einsatz solcher Maßnahmen ist also fallspezifisch zu prüfen. Die Resultate aus dem visionären Szenario weisen auf das große Potenzial von verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren hin. Da Knotenpunkte die größten Engpässe im urbanen Netz darstellen, scheint hier in Kombination mit einem hohen Automatisierungsgrad die Möglichkeit zu bestehen, städtische Kapazitäten substantiell zu erhöhen. Speziell die gewählten Annahmen zum

Fahrverhalten der AVF haben einen großen Einfluss auf diese Ergebnisse. Es bleibt abzuwarten, wie sich dieses Fahrverhalten und auch die Reaktion von menschlichen Fahrern auf AVF in Zukunft entwickelt.

Die Befragung von Fachleuten zu den erzielten Ergebnissen und zur allgemeinen Entwicklung von AVF beförderten zutage, dass Übereinstimmung darüber herrscht, dass der komplexe Zusammenhang von Automatisierung und Leistungsfähigkeit noch nicht abschließend geklärt ist. Neben dem Fakt, dass viele verschiedene Einflussfaktoren existieren, ist auch die große Rolle von noch nicht abschließend zu verifizierenden Annahmen ein Grund dafür. Letztlich ist laut Einschätzung der Fachleute noch unklar, in welchem Ausmaß AVF in Zukunft in städtischen Gebieten überhaupt verkehren werden.

Der Anspruch, den Einfluss von AVF auf Kenngrößen des Verkehrsablaufs in Regelwerke einzubringen, wurde allgemein positiv aufgenommen. Es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass aufgrund der Komplexität der Thematik eine Beschreibung in den „Hinweisen zur mikroskopischen Simulation“ angebracht sein könnte als im HBS. Der vereinfachende Ansatz der Korrekturfaktoren schien jedoch Anklang zu finden. Nichtsdestotrotz kann dies nur auf Basis empirischer Daten geschehen, da die FGSV-Regelwerke den IST-Stand der Technik abbilden und keine zukünftigen Themen behandeln, die mit großer Unsicherheit behaftet sind. Der im Projekt gewählte Ansatz ist dennoch aufschlussreich, da er auch für Eingangsdaten aus zukünftig echten Messungen verwendet werden kann. Die angewandte Methodik stellt somit ein adäquates Mittel dar, um in den Entwurf zukünftiger Straßenverkehrsanlagen einzufließen. Abschließend wurden Handlungsempfehlungen für Forschung und Praxis entwickelt. Erstere sollte vermehrt Fokus auf Projekte legen, die AVF auf die Straße bringen, die Simulatoren einsetzen, und die auf Testfeldern basieren. Damit kann das Fahrverhalten der wichtigsten Akteure im Mischverkehr besser untersucht werden. Dies kann schlussendlich in die Verbesserung der Modelle in mikroskopischen Simulationsumgebungen einfließen. Zudem sollten zukünftig Automobilhersteller vermehrt eingebunden werden, um die Modelle gemeinsamer genauer kalibrieren und validieren zu können. Die Kommunikation und Kooperation werden maßgebend für die Steigerung der Leistungsfähigkeit sein und verdienen daher mehr Aufmerksamkeit. Für die Praxis wurde festgehalten, dass komplexe Themen, zu welchen die Modellierung von AVF zählt, auf Basis von mikroskopischen Simulationen untersucht werden sollten. Eine verbindliche Abschätzung entsprechender Effekte auf Basis von Handrechenverfahren gemäß HBS ist schlichtweg noch nicht möglich, da noch zu wenige empirische Daten vorhanden sind. Sobald dies der Fall ist, kann der Ansatz mit Korrekturfaktoren verfolgt werden.

## 7.4. Vision

Abschließend soll hier eine Vision für die mögliche zukünftige Entwicklung von städtischer Infrastruktur präsentiert werden. Anhand der aufgezeigten Auswirkungen auf den Verkehrsablauf, insbesondere der Kapazitätssteigerung, können erste Aussagen zu möglichen Infrastrukturweiterungen bzw. -anpassungen unter Berücksichtigung von AVF abgeleitet werden. Erneut sei darauf hingewiesen, dass die entsprechenden Aussagen auf den getroffenen und noch mit Unsicherheiten behafteten Modellierungsannahmen basieren.

Bei geringeren Durchdringungsgraden der AVF wird es zu gering positiven Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit kommen. Die Knotenpunktregelung, existierende Konflikte zwischen den Verkehrsteilnehmern (deren Auflösung zu Kapazitätseinbußen führen kann) sowie andere Effekte, werden den positiven Einfluss der AVF auf die Leistungsfähigkeit relativieren. Bei hohen Anteilen von AVF im Verkehrsfluss könnte aus Gründen der Verkehrssicherheit eine teilweise Separierung mittels Sonderfahrstreifen sinnvoll sein. Dadurch würde die Leistungsfähigkeit im Vergleich zum IST-Zustand nicht verringert werden, wie die Ergebnisse des innovativen Szenarios zeigen. Diese Sonderfahrstreifen würden dazu führen, dass Fahrzeugfolgevorgänge zwischen menschlichen Fahrern und AVF reduziert werden könnten. In ferner Zukunft - bei sehr hohen Durchdringungsgraden und adaptiven Knotenpunktregelungsmechanismen, welche die hohe Datenverfügbarkeit ausnutzen könnten - können sehr hohe Kapazitäten erreicht werden. Die Ergebnisse des visionären Szenarios zeigen auf, dass für den untersuchten Streckenzug sogar eine doppelt so hohe Leistungsfähigkeit erreicht wurde. Dies weist darauf hin, dass Fahrstreifen umgewidmet werden könnten, zum Beispiel für vulnerable Verkehrsteilnehmer und die Kapazität auf dem gleichen Stand wie heute bliebe. Dies hätte neben einer Umverteilung des verfügbaren Verkehrsraums auf alle Verkehrsteilnehmer den zusätzlichen Vorteil, dass es zu keinem induzierten Verkehr aufgrund höherer Kapazitäten käme. Abschließend ist festzuhalten, dass solch hohe Durchdringungsgrade eventuell nur möglich sein werden, wenn dezidierte Betriebsbereiche in Städten ausgewiesen werden können. Ansonsten kann die komplexe Interaktion zwischen allen Verkehrsteilnehmern (Radfahrer, Fußgänger, konventionelle Fahrzeuge, AVF, Kutschen, Roller, etc.) und die daraus resultierenden Anforderungen an die Verkehrssicherheit in einer sehr konservativen Fahrweise von AVF münden. Dies hätte schlussendlich nur geringe oder gar keine positiven Effekte auf die auf den motorisierten Individualverkehr bezogene Leistungsfähigkeit städtischer Infrastruktur.

## 8. Literaturverzeichnis

5G Automotive Association e.V. (2019). *5GAA welcomes Council objection against C-ITS Delegated Act*. Retrieved from <https://5gaa.org/news/5gaa-welcomes-council-objection-against-c-its-delegated-act/>

Amini, S., Ambühl, L., Tilg, G., Bogenberger, K., & Menendez, M. (2020). Generating and calibrating large-scale, mesoscopic SUMO networks. In *SUMO User Conference 2020*.

Atkins. (2016). Research on the impacts of connected and autonomous vehicles (CAVs) on traffic flow Stage 2: Traffic Modelling and Analysis Technical Report, (May). Retrieved from [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/530091/impacts-of-connected-and-autonomous-vehicles-on-traffic-flow-summary-report.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/530091/impacts-of-connected-and-autonomous-vehicles-on-traffic-flow-summary-report.pdf)

Au, T.-C., Zhang, S., Stone, P., Zhang, S., & Stone, P. (2015). Autonomous Intersection Management for Semi-Autonomous Vehicles, 116–132. <https://doi.org/10.4324/9781315756684-16>

Ault, J., & Sharon, G. (2021). Reinforcement Learning Benchmarks for Traffic Signal Control, (NeurIPS).

Bashiri, M., & Fleming, C. H. (2017). A platoon-based intersection management system for autonomous vehicles. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings* (pp. 667–672). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/IVS.2017.7995794>

BASt. (2012). TLS: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen.

BMVI. (2015). Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren, 32. Retrieved from [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/broschuere-strategie-automatisiertes-vernetztes-fahren.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/broschuere-strategie-automatisiertes-vernetztes-fahren.pdf?__blob=publicationFile)

Boriboonsomsin, K., Barth, M. J., Zhu, W., & Vu, A. (2012). Eco-routing navigation system based on multisource historical and real-time traffic information. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(4), 1694–1704. <https://doi.org/10.1109/TITS.2012.2204051>

- Busch, F., Krause, S., Fehn, F., Richner, M., Armbruster, S., & Winzer, T. (2020). *Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 5: Mischverkehr*.
- Calvert, S. C., Schakel, W. J., & van Lint, J. W. C. (2017). Will automated vehicles negatively impact traffic flow? *Journal of Advanced Transportation*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3082781>
- CoEXist Consortium. (2020). CoEXist Our Approach. Retrieved from <https://www.h2020-coexist.eu/our-approach/>
- Daganzo, C. F. (2007). Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(1), 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.03.001>
- Day, C. M., & Bullock, D. M. (2016). Detector-Free Signal Offset Optimization with Limited Connected Vehicle Market Penetration: Proof-of-Concept Study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2558(1), 54–65. <https://doi.org/10.3141/2558-06>
- Diakaki, C., Papageorgiou, M., Dinopoulou, V., Papamichail, I., & Garyfalia, M. (2015). State-of-the-art and -practice review of public transport priority strategies. *IET Intelligent Transport Systems*, 9(4), 391–406. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2014.0112>
- Do, W., Rouhani, O. M., & Miranda-Moreno, L. (2019). Simulation-Based Connected and Automated Vehicle Models on Highway Sections: A Literature Review. *Journal of Advanced Transportation*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9343705>
- Dresner, K., & Stone, P. (2007). Sharing the Road: Autonomous Vehicles Meet Human Drivers. In *The Twentieth International Joint Conference on Artificial Intelligence* (pp. 1263–1268). Hyderabad, India. Retrieved from <http://www.cs.utexas.edu/~%7Bkdresner,pstone%7D>
- Du, Z., HomChaudhuri, B., & Pisu, P. (2018). Hierarchical distributed coordination strategy of connected and automated vehicles at multiple intersections. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 22(2), 144–158. <https://doi.org/10.1080/15472450.2017.1407930>
- Elhenawy, M., Elbery, A. A., Hassan, A. A., & Rakha, H. A. (2015). An Intersection Game-Theory-Based Traffic Control Algorithm in a Connected Vehicle

Environment. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC* (Vol. 2015-October, pp. 343–347). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2015.65>

Erdmann, J. (2015). SUMO's lane-changing model. In *2nd SUMO User Conference*.

Europäische Kommission. (2019). *Delegated regulation C/2019/1789*. Retrieved from [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI\\_COM%3AC%282019%291789](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI_COM%3AC%282019%291789)

Feng, Y., Head, K. L., Khoshmagham, S., & Zamanipour, M. (2015). A real-time adaptive signal control in a connected vehicle environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 460–473. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.01.007>

FGSV. (2005). Hinweise zum Fundamentaldiagramm.

FGSV. (2006a). Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation.

FGSV. (2006b). Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen.

FGSV. (2008). Richtlinien für integrierte Netzplanung.

FGSV. (2015a). *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*.

FGSV. (2015b). RiLSA: Richtlinien für Lichtsignalanlagen.

Friedrich, B. (2015). Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge. In *Autonomes Fahren* (pp. 331–350). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45854-9>

Gasser, T., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., ... Vogt, W. (2012). *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe "Fahrzeugsicherheit" Heft F83, Januar 2012*.

Geroliminis, N., & Daganzo, C. F. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9), 759–770. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.02.002>

Gerstenberger, M. (2015). Unfallgeschehen an Knotenpunkten - Grundlagenuntersuchung zu Ursachen und Ansätzen zur Verbesserung durch Assistenz, 305. Retrieved from <http://nbn->

resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20150521-1239434-1-4

- Gipps, P. G. (1981). A behavioral car-following model for computer simulation. *Transportation Research*, 15, 105–111.
- Goodall, N. J., Smith, B. L., & Park, B. (Brian). (2013). Traffic Signal Control with Connected Vehicles. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2381(1), 65–72. <https://doi.org/10.3141/2381-08>
- Gradinescu, V., Gorgorin, C., Diaconescu, R., Cristea, V., & Iftode, L. (2007). Adaptive traffic lights using car-to-car communication. In *IEEE Vehicular Technology Conference* (pp. 21–25). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/VETECS.2007.17>
- Grigoropoulos, G., Hosseini, S. A., Keler, A., Kathis, H., Spangler, M., Busch, F., & Bogenberger, K. (2021). Traffic simulation analysis of bicycle highways in urban areas. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1–25. <https://doi.org/10.3390/su13031016>
- Guo, Q., Li, L., & (Jeff) Ban, X. (2019). Urban traffic signal control with connected and automated vehicles: A survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 101(January), 313–334. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.026>
- Harth, M., Langer, M., & Bogenberger, K. (2021). Automated Calibration of Traffic Demand and Traffic Lights in SUMO Using Real-World Observations. *SUMO Conference Proceedings*.
- Hartmann, M., Motamedidehkordi, N., Krause, S., Hoffmann, S., Vortisch, P., & Busch, F. (2017). Impact of Automated Vehicles on Capacity of the German Freeway Network.
- He, Q., Head, K. L., & Ding, J. (2012). PAMSCOD: Platoon-based arterial multi-modal signal control with online data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 20(1), 164–184. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.05.007>
- Hoogendoorn, R., Varotto, S. F., Bogenberger, K., Hagenzieker, M., & van Arem, B. (2015). Towards Optimal Traffic Safety on Freeways through Automated Vehicles and Traffic System Complexity Estimation. In *94th Annual Meeting of the Transportation Research Board*.

- Ilgin Guler, S., Menendez, M., Meier, L., Guler, S. I., Menendez, M., & Meier, L. (2014). Using connected vehicle technology to improve the efficiency of intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 46, 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.05.008>
- Ioannou, P. A., & Stefanovic, M. (2005). Evaluation of ACC vehicles in mixed traffic: Lane change effects and sensitivity analysis. In *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (Vol. 6, pp. 79–89). <https://doi.org/10.1109/TITS.2005.844226>
- Islam, S. M. A. B. Al, & Hajbabaie, A. (2017). Distributed coordinated signal timing optimization in connected transportation networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 80, 272–285. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.04.017>
- Kaltenhäuser, B., Werdich, K., Dandl, F., & Bogenberger, K. (2020). Market development of autonomous driving in Germany. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 132(December 2019), 882–910. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.01.001>
- Kaths, H. J. (2017). Kooperative Lichtsignalsteuerung Integration von Fahrzeugen in die Steuerung vernetzter Verkehrssysteme, (May), 200.
- Kaths, J., Papapanagiotou, E., & Busch, F. (2015). Traffic Signals in Connected Vehicle Environments: Chances, Challenges and Examples for Future Traffic Signal Control. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2015-October*, 125–130. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2015.29>
- Katsaros, K., & Dianati, M. (2016). A conceptual 5G vehicular networking architecture. In *5G Mobile Communications* (pp. 595–623). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5_22)
- Katsaros, K., Kernchen, R., Dianati, M., & Rieck, D. (2011). Performance study of a Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) application using an integrated cooperative ITS simulation platform. In *IWCMC 2011 - 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference* (pp. 918–923). <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2011.5982524>
- Keler, A., Grigoropoulos, G., Kaths, H., & Spangler, M. (2018). *RASCH: RAdSCHnellwege: Gestaltung effizienter und sicherer Infrastruktur*.

- Kesting, A., Treiber, M., & Helbing, D. (2010). Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1928), 4585–4605. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0084>
- Kesting, A., Treiber, M., Schönhof, M., & Helbing, D. (2007). Extending Adaptive Cruise Control to Adaptive Driving Strategies. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2000(1), 16–24. <https://doi.org/10.3141/2000-03>
- Kesting, A., Treiber, M., Schönhof, M., & Helbing, D. (2008). Adaptive cruise control design for active congestion avoidance. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(6), 668–683. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2007.12.004>
- Kesting, A., Treiber, M., Schönhof, M., Kranke, F., & Helbing, D. (2007). Jam-Avoiding Adaptive Cruise Control (ACC) and its Impact on Traffic Dynamics. In *Traffic and Granular Flow'05* (pp. 633–643). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-47641-2\\_62](https://doi.org/10.1007/978-3-540-47641-2_62)
- Koshi, M., Iwasaki, M., & Ohkura, I. (1981). Some Findings and an Overview on Vehicular Flow Characteristics. In *Proc. 8th Int. Symposium on Transportation and Traffic Theory*.
- Kranke, F., & Poppe, H. (2008). *Traffic guard - merging sensor data and C2I/C2C information for proactive, congestion avoiding driver assistance systems*.
- Krause, S., Motamedidehkordi, N., Hoffmann, S., Busch, F., Hartmann, M., & Vortisch, P. (2017). *Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur. FAT-Schriftenreihe*.
- Krauss, S. (1998). *Microscopic modeling of traffic flow: investigation of collision free vehicle dynamics*.
- Krauß, S. (1998). *Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics*. University of Cologne.
- Kreidieh, A. R., Wu, C., & Bayen, A. M. (2018). Dissipating stop-and-go waves in closed and open networks via deep reinforcement learning. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2018-Novem*, 1475–1480. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569485>

- Kühn, M. (2019). Der Beitrag des automatisierten Fahrens zur Erhöhung der Verkehrssicherheit (pp. 43–55). Springer Vieweg, Wiesbaden.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-658-26945-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-658-26945-6_3)
- Levin, M. W., & Boyles, S. D. (2016). A multiclass cell transmission model for shared human and autonomous vehicle roads. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 62, 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.10.005>
- Levin, M. W., Boyles, S. D., & Patel, R. (2016). Paradoxes of reservation-based intersection controls in traffic networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 90, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.05.013>
- Li, D., & Wagner, P. (2019). Impacts of gradual automated vehicle penetration on motorway operation: a comprehensive evaluation. *European Transport Research Review*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0375-3>
- Liang, X. (Joyce), Guler, S. I., & Gayah, V. V. (2018). Signal Timing Optimization with Connected Vehicle Technology: Platooning to Improve Computational Efficiency. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(18), 81–92. <https://doi.org/10.1177/0361198118786842>
- Lioris, J., Pedarsani, R., Tascikaraoglu, F. Y., & Varaiya, P. (2017). Platoons of connected vehicles can double throughput in urban roads. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77, 292–305.  
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.01.023>
- Liu, B., Shi, Q., Song, Z., & El Kamel, A. (2019). Trajectory planning for autonomous intersection management of connected vehicles. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 90, 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.10.002>
- Liu, H., Kan, X. (David), Shladover, S. E., Lu, X. Y., & Ferlis, R. E. (2018a). Impact of cooperative adaptive cruise control on multilane freeway merge capacity. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 22(3), 263–275. <https://doi.org/10.1080/15472450.2018.1438275>
- Liu, H., Kan, X. (David), Shladover, S. E., Lu, X. Y., & Ferlis, R. E. (2018b). Modeling impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on mixed traffic flow in multi-lane freeway facilities. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, 261–279. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.07.027>

- Liu, Y., Guo, J., Taplin, J., & Wang, Y. (2017). Characteristic analysis of mixed traffic flow of regular and autonomous vehicles using cellular automata. *Journal of Advanced Transportation*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/8142074>
- Lobo, S. C., Neumeier, S., Fernandez, E. M. G., & Facchi, C. (2020). InTAS -- The Ingolstadt Traffic Scenario for SUMO. In *SUMO Conference Proceedings* (pp. 1–20). Retrieved from <http://arxiv.org/abs/2011.11995>
- Lopez, P. A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y.-P., Hilbrich, R., ... Wießner, E. (2018). Microscopic Traffic Simulation using SUMO. In *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. IEEE.
- Lu, Q., Tettamanti, T., Hörcher, D., & Varga, I. (2020). The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity: an experimental analysis by microscopic traffic simulation. *Transportation Letters*, 12(8), 540–549. <https://doi.org/10.1080/19427867.2019.1662561>
- Mahmassani, H. S. (2016). 50th Anniversary invited article autonomous vehicles and connected vehicle systems: Flow and operations considerations. *Transportation Science*, 50(4), 1140–1162. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0712>
- Milakis, D. (2019, January 2). Long-term implications of automated vehicles: an introduction. *Transport Reviews*. Routledge. <https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1545286>
- Milakis, D., Van Arem, B., & Van Wee, B. (2017). Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. <https://doi.org/10.1080/15472450.2017.1291351>
- Milanés, V., & Shladover, S. E. (2014). Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 48, 285–300. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.09.001>
- Mirchandani, P., & Head, L. (2001). A real-time traffic signal control system: Architecture, algorithms, and analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 9(6), 415–432. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(00\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(00)00047-4)
- Motamedidehkordi, N., Benz, T., & Margreiter, M. (2016). Shockwave Analysis on

Motorways and Possibility of Damping by Autonomous Vehicles (pp. 37–52).  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-20855-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20855-8_4)

Motamedidehkordi, N., Margreiter, M., & Benz, T. (2016a). Effects of Connected Highly Automated Vehicles on the Propagation of Congested Patterns on Freeways.

Motamedidehkordi, N., Margreiter, M., & Benz, T. (2016b). Shockwave Suppression by Vehicle-to-Vehicle Communication. In *Transportation Research Procedia* (Vol. 15, pp. 471–482). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.06.040>

Motamedidehkordi, N., Margreiter, M., Hoffmann, S., & Busch, F. (2016). The impacts of automated vehicles on operational and safety performance of freeway traffic flow. In *Annual meeting of the TRB*.

Movaghar, S., Mesbah, M., & Habibian, M. (2020). Optimum Location of Autonomous Vehicle Lanes: A Model Considering Capacity Variation. *Mathematical Problems in Engineering, 2020*. <https://doi.org/10.1155/2020/5782072>

Olia, A., Razavi, S., Abdulhai, B., & Abdelgawad, H. (2018). Traffic capacity implications of automated vehicles mixed with regular vehicles. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations, 22*(3), 244–262. <https://doi.org/10.1080/15472450.2017.1404680>

Olstam, J., Johansson, F., Alessandrini, A., Sukennik, P., Lohmiller, J., & Friedrich, M. (2020). An Approach for Handling Uncertainties Related to Behaviour and Vehicle Mixes in Traffic Simulation Experiments with Automated Vehicles. *Journal of Advanced Transportation, 2020*. <https://doi.org/10.1155/2020/8850591>

Papapanagiotou, E., & Busch, F. (2020). Extended Observer for Urban Traffic Control Based on Limited Measurements from Connected Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 21*(4), 1664–1676.  
<https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2939904>

Protzmann, R., Radusch, I., Festag, A., Fritzsche, R., & Rehme, M. (2018). *IV2X Integrierte Betrachtung Fahrzeugkommunikation*. Berlin.

Redana, S., Bulakci, Ö., Mannweiler, C., Gallo, L., Kousaridas, A., Navrátil, D., ... Mutafungwa, E. (2019). 5G PPP Architecture Working Group - View on 5G Architecture, Version 3.0. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3265031>

- SAE On-Road Automated Vehicle Standards Committee. (2014). *Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems. SAE Standard J3016* (Vol. 7). [https://doi.org/10.4271/J3016\\_201401](https://doi.org/10.4271/J3016_201401)
- SAVe Consortium. (2021). *SAVe: Funktions- und Verkehrssicherheit im Automatisierten und Vernetzten Fahren*.
- Schakel, W. J., Van Arem, B., & Netten, B. D. (2010). Effects of cooperative adaptive cruise control on traffic flow stability. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC* (pp. 759–764). <https://doi.org/10.1109/ITSC.2010.5625133>
- Schimandl, F., Baur, M., Hoffmann, S., Gabloner, S., & Margreiter, M. (2013). Effects of cooperative systems on traffic safety and efficiency - results of the German sim. In *mobil.TUM 2013*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1792.5526>
- Schmidt-Eisenlohr, F. (2010). Interference in vehicle-to-vehicle communication networks: Analysis, modeling, simulation and assessment. Retrieved from [https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=T-H7J9\\_22yQC&oi=fnd&pg=PR1&dq=schmidt-eisenlohr+2010+interference+in+vehicle-to-vehicle+communication+networks&ots=n8ACJS0IX2&sig=r-jYnKWpNy9GcT1RWFVNpii7qgQ](https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=T-H7J9_22yQC&oi=fnd&pg=PR1&dq=schmidt-eisenlohr+2010+interference+in+vehicle-to-vehicle+communication+networks&ots=n8ACJS0IX2&sig=r-jYnKWpNy9GcT1RWFVNpii7qgQ)
- Shladover, S. E., Su, D., & Lu, X.-Y. (2012). Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2324(1), 63–70. <https://doi.org/10.3141/2324-08>
- simTD. (2013). Sichere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland [www.simTD.de](http://www.simTD.de)  
[www.simTD.de](http://www.simTD.de), 1–62.
- Statistisches Bundesamt. (2018). *Unfälle von Frauen und Männern 2017*.
- Sun, Z., Jin, W. L., & Ritchie, S. G. (2017). Simultaneous estimation of states and parameters in Newell's simplified kinematic wave model with Eulerian and Lagrangian traffic data. *Transportation Research Part B: Methodological*, 104, 106–122. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.06.012>
- Talebpour, A., & Mahmassani, H. S. (2016). Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. *Transportation Research Part C:*

*Emerging Technologies*, 71, 143–163. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.07.007>

Talebpour, A., Mahmassani, H. S., & Elfar, A. (2017). Investigating the effects of reserved lanes for autonomous vehicles on congestion and travel time reliability. *Transportation Research Record*, 2622(1), 1–12. <https://doi.org/10.3141/2622-01>

Talebpour, A., Mahmassani, H. S., & Hamdar, S. H. (2018). Effect of information availability on stability of traffic flow: Percolation theory approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 117, 624–638. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.09.005>

TEMPUS Consortium. (n.d.). TEMPUS. Retrieved from <https://tempus-muenchen.de/>

Tilg, G., Yang, K., & Menendez, M. (2018). Evaluating the effects of automated vehicle technology on the capacity of freeway weaving sections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 96, 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.09.014>

Tonon, D., Aronna, M. S., & Kalise, D. (Eds.). (2017). *Optimal Control: Novel Directions and Applications* (Vol. 2180). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-60771-9>

Treiber, M., Hennecke, A., & Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, 62(2), 1805–1824. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.1805>

Treiber, M., & Kesting, A. (2013). *Traffic Flow Dynamics. Traffic Flow Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-32460-4>

UR:BAN Konsortium. (2016). *UR:BAN Ergebnisse*.

van Arem, B., de Vos, A. P., & Van der Schuren, M. (1997). The microscopic traffic simulation model MIXIC 1.3, (REPORT INRO-VVG 1997).

Van Arem, B., Van Driel, C. J. G., & Visser, R. (2006). The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(4), 429–436. <https://doi.org/10.1109/TITS.2006.884615>

Vander Laan, Z., & Sadabadi, K. F. (2017). Operational performance of a congested

corridor with lanes dedicated to autonomous vehicle traffic. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(1), 42–52.

<https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.05.006>

VanderWerf, J., Shladover, S., Kourjanskaia, N., Miller, M., & Krishnan, H. (2001). Modeling Effects of Driver Control Assistance Systems on Traffic. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1748(1), 167–174. <https://doi.org/10.3141/1748-21>

VDA. (2015). *Automatisierung: Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren*. VDA Magazin. Berlin. <https://doi.org/10.1007/s00502-008-0503-6>

Verbundpartner. (2019). *Digitaler Knoten 4.0*.

Vinitsky, E., Kreidieh, A., Le Flem, L., Kheterpal, N., Jang, K., Wu, C., ... Bayen, A. M. (2018). Benchmarks for reinforcement learning in mixed-autonomy traffic, (CoRL). Retrieved from <https://github.com/flow-project/flow>.

Vollrath, M., Briest, S., & Schießl, C. (2006). *Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit*. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Retrieved from <http://bast.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2011/300/pdf/F60.pdf>

Wagner, P. (2016). Traffic control and traffic management in a transportation system with autonomous vehicles. In *Autonomous Driving: Technical, Legal and Social Aspects* (pp. 301–316). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-48847-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-662-48847-8_15)

Wiedemann, R. (1974). *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Universität Karlsruhe.

Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., & Singer, C. (2009). *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. [https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9977-4\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9977-4_45)

Wu, C., Jang, K., Vinitsky, E., & Bayen, A. (2018). Flow: Open Source Reinforcement Learning for Traffic Control, (Nips 2018), 4.

Wu, C., Kreidieh, A. R., Parvate, K., Vinitsky, E., & Bayen, A. M. (2017). Flow: Architecture and Benchmarking for Reinforcement LEarning in Traffic Control. *ArXiv*, 1–16.

- Xiao, L., Wang, M., Schakel, W., & van Arem, B. (2018). Unravelling effects of cooperative adaptive cruise control deactivation on traffic flow characteristics at merging bottlenecks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 96(May), 380–397. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.10.008>
- Xiao, L., Wang, M., & Van Arem, B. (2017). Realistic car-following models for microscopic simulation of adaptive and cooperative adaptive cruise control vehicles. *Transportation Research Record*, 2623, 1–9. <https://doi.org/10.3141/2623-01>
- Yang, K., Guler, S. I., & Menendez, M. (2016). Isolated intersection control for various levels of vehicle technology: Conventional, connected, and automated vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 72, 109–129. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.08.009>
- Zeidler, V., Buck, H. S., Kautzsch, L., Vortisch, P. D. P., & Weyland, C. (2018). Simulation of Autonomous Vehicles Based on Wiedemann ' s Car Following Model in. In *Transportation Research Record* (Vol. 114, p. e00146). Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00146>
- Zhong, Z., Nejad, M., & Lee, E. E. (2020). Autonomous and Semi-Autonomous Intersection Management: A Survey. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 3014074, 1–16. <https://doi.org/10.1109/MITS.2020.3014074>
- Zohdy, I. H., & Rakha, H. (2012). Game theory algorithm for intersection-based cooperative adaptive cruise control (CACC) systems. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC* (pp. 1097–1102). <https://doi.org/10.1109/ITSC.2012.6338644>

## 9. Anhang

### 9.1. Ergebnisse der Modellanpassung an das HBS

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die spezifischen Anpassungsparameter und die Ausprägungen, welche für die jeweilige Straßenkategorie zum kleinsten MSE führen.

Tabelle 14: Modellanpassungsergebnisse: Angebaute Hauptverkehrsstraße mit mittlerer bis hoher Erschließungsintensität

Parameterbezeichnung	Parameterausprägung	Parametererklärung
minGap	1,64 [m]	Mindestabstand im Stehen
tau	1,0 [s]	Der vom Fahrer gewünschte (Mindest-)Zeitabstand. Er basiert auf dem Nettoabstand zwischen dem hinteren Ende des vorderen Fahrzeugs und dem vorderen Ende des folgenden Fahrzeugs.
sigma	0,34	Die Unvollkommenheit des Fahrers
SpeedFactor (Mittelwert)	1,10	Der von den Fahrzeugen angewandte Multiplikator für Geschwindigkeitsbegrenzungen auf der Strecke.
SpeedFactor (Standardabweichung)	0,20	Die Standardabweichung des Multiplikators für Geschwindigkeitsbegrenzungen auf der Strecke
RMSE	1,35 [km/h]	

Tabelle 15: Modellanpassungsergebnisse: Angebaute Hauptverkehrsstraße mit niedriger Erschließungsintensität

Parameterbezeichnung	Parameterausprägung	Parametererklärung
minGap	1,0 [m]	Mindestabstand im Stehen
tau	1,0 [s]	Der vom Fahrer gewünschte (Mindest-)Zeitabstand. Er basiert auf dem Nettoabstand zwischen dem hinteren Ende des vorderen Fahrzeugs und dem vorderen Ende des folgenden Fahrzeugs.
sigma	0,19	Die Unvollkommenheit des Fahrers
SpeedFactor (Mittelwert)	1,11	Der von den Fahrzeugen angewandte Multiplikator für Geschwindigkeitsbegrenzungen auf der Strecke.
SpeedFactor (Standardabweichung)	0,18	Die Standardabweichung des Multiplikators für Geschwindigkeitsbegrenzungen auf der Strecke
RMSE	1,0 [km/h]	

Tabelle 16: Modellanpassungsergebnisse: Anbaufreie Hauptverkehrsstraße

Parameterbezeichnung	Parameterausprägung	Parametererklärung
minGap	2,85 [m]	Mindestabstand im Stehen
tau	1,21 [s]	Der vom Fahrer gewünschte (Mindest-)Zeitabstand. Er basiert auf dem Nettoabstand zwischen dem hinteren Ende des vorderen Fahrzeugs und dem vorderen Ende des folgenden Fahrzeugs.
sigma	0,59	Die Unvollkommenheit des Fahrers
SpeedFactor (Mittelwert)	1,16	Der von den Fahrzeugen angewandte Multiplikator für Geschwindigkeitsbegrenzungen auf der Strecke.
SpeedFactor (Standardabweichung)	0,12	Die Standardabweichung des Multiplikators für Geschwindigkeitsbegrenzungen auf der Strecke
RMSE	0,59 [km/h]	

Zusätzlich werden die Ergebnisse in den nachfolgenden Abbildungen graphisch dargestellt.

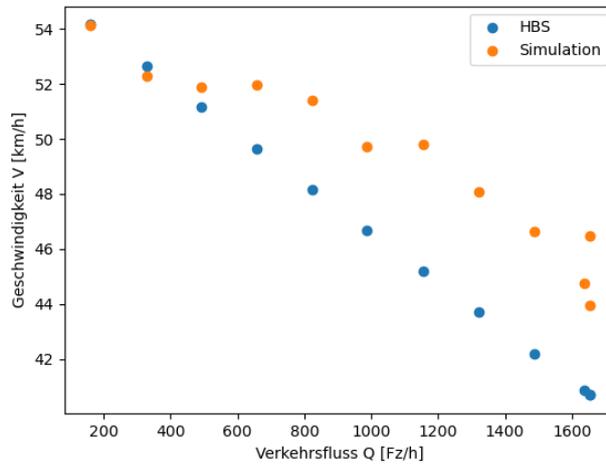


Abbildung 32: Ergebnisse der Anpassung des Simulationsmodells an das HBS (Straßenkategorie: Angebaute Hauptverkehrsstraße mit niedriger Erschließungsintensität)

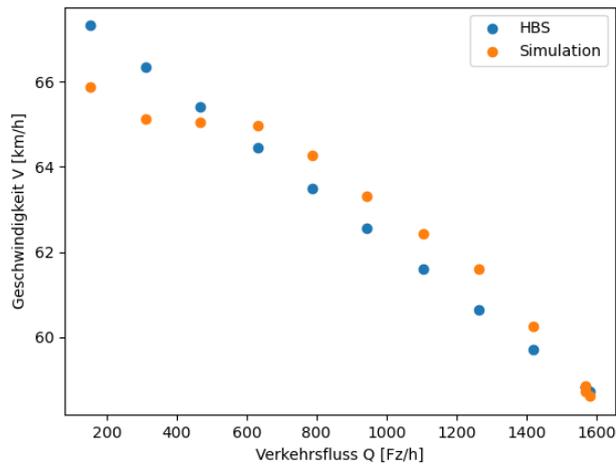


Abbildung 33: Ergebnisse der Anpassung des Simulationsmodells an das HBS (Straßenkategorie: Anbaufreie Hauptverkehrsstraße)

## 9.2. Fundamentaldiagramme

### Konservative Szenarien

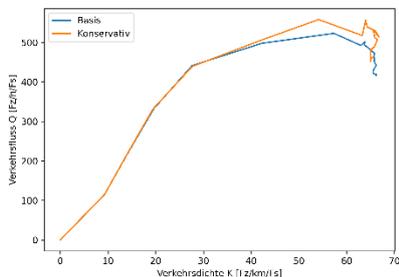


Abbildung 34: Fundamentaldiagramm für das konservative Szenario und den Streckenzug IM

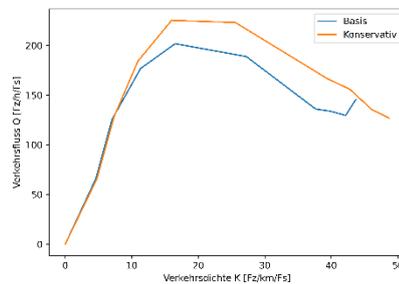


Abbildung 35: Fundamentaldiagramm für das konservative Szenario und den Streckenzug IG

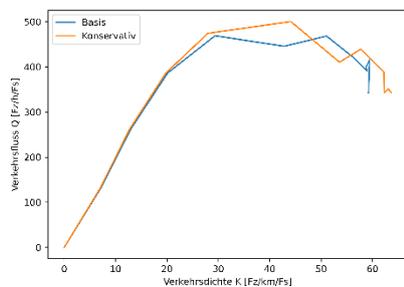


Abbildung 36: Fundamentaldiagramm für das konservative Szenario und den Streckenzug MUC

### Innovative Szenarien

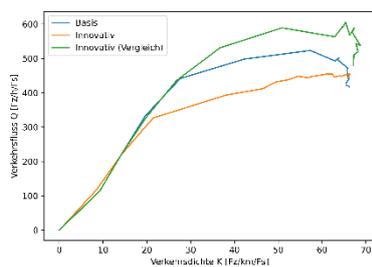


Abbildung 37: Fundamentaldiagramm für das innovative Szenario und den Streckenzug IM

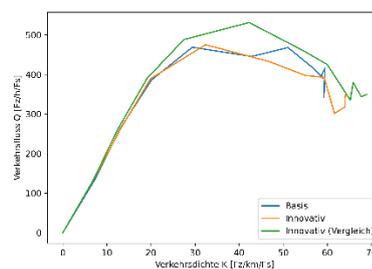


Abbildung 38: Fundamentaldiagramm für das innovative Szenario und den Streckenzug MUC

## 9.3. Korrekturfaktoren für Fundamentaldiagramme

### Konservative Szenarien

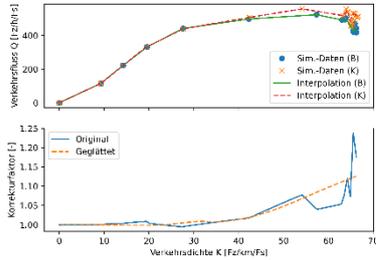


Abbildung 39: Korrekturfaktor für das konservative Szenario und den Streckenzug IM

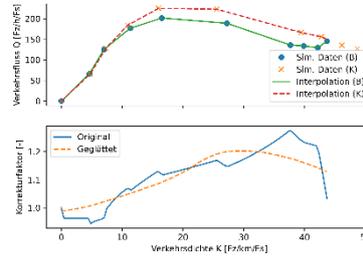


Abbildung 40: Korrekturfaktor für das konservative Szenario und den Streckenzug IG

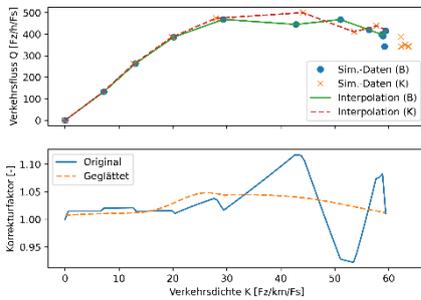


Abbildung 41: Korrekturfaktor für das konservative Szenario und den Streckenzug MUC

### Innovative Szenarien

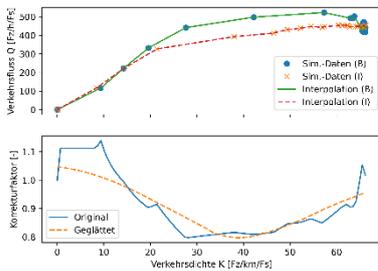


Abbildung 42: Korrekturfaktor für das innovative Szenario und den Streckenzug IM

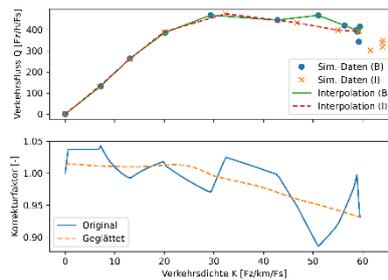


Abbildung 43: Korrekturfaktor für das innovative Szenario und den Streckenzug MUC

## 9.4. Sättigungsverkehrsstärke für einen einzelnen Knotenpunkt

Um die zuvor erwähnten Probleme bei der Auswertung der Sättigungsverkehrsstärken umgehen zu können, wurde noch ein einzelner Knotenpunkt hinsichtlich dieser Kennzahl untersucht. Hierfür wurde die zentrale, lichtsignalgesteuerte Kreuzung des Streckenzugs IK verwendet. Die Untersuchung wurde für Durchdringungsgrade von 33 %, 66 % und 95 % von AVF im Verkehrsfluss durchgeführt, es wurden jedoch keine zusätzlichen Verkehrsmanagementmaßnahmen evaluiert. Dies entspricht daher dem konservativen Szenario, sowie dem innovativen und visionären Vergleichsszenario.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 17 dargestellt. Diese entsprechen dabei der Intuition, dass mit steigendem Durchdringungsgrad von AVF auch die Sättigungsverkehrsstärke steigt. Daher können die davon abweichenden Ergebnisse für die Streckenzüge auf die komplexe Verkehrsdynamik (z.B. Abbiegeströme) zurückgeführt werden.

Tabelle 17: Sättigungsverkehrsstärken für die einzelne Kreuzung

Szenario	Sättigungsverkehrsstärke [Fz/h]	Korrekturfaktor [-]
Basis	2014	1,00
Konservativ	2201	1,09
Innovativ (Vergleich)	2660	1,32
Visionär (Vergleich)	3201	1,59

## 9.5. Interviewfragen

### 9.5.1. AA 3.1 Telematik

- Welche Auswirkung haben AVF in städtischen Netzen aus Sicht der Telematik?
- Was sind die dringendsten Arbeiten, um das Potential von AVF maximal ausschöpfen zu können?
- Welche laufenden Entwicklungen und Forschungsprojekte sind Ihnen bekannt?
- Wie wird das Thema im AA behandelt?
- Der AA formuliert das „Themenfeld 2: Automatisierte und vernetzte Verkehrssysteme“. Was wird hier speziell bearbeitet? Bestehen darüber hinaus Aktivitäten des AAs?

- Wurde bereits spezifischer Handlungsbedarf bzgl. der Überarbeitung von FGSV-Regelwerken identifiziert?
- Sind Simulationsstudien ein hilfreiches Werkzeug für den AA 3.1?
- Inwiefern können die Ergebnisse aus dem Projekt LSS zum Fortschritt aus Sicht des AA 3.1 beitragen?
- Welchen Fokus sollten zukünftige Forschungsaktivitäten haben?

### 9.5.2. AA 3.3 Verkehrsbeeinflussung innerorts

- Welche Auswirkung haben AVF in städtischen Netzen aus Sicht der innerörtlichen Verkehrsbeeinflussung?
- Welche Maßnahmen/Strategien werden sich wahrscheinlich durchsetzen/sind vielversprechend?
- Ist die *Reinforcement Learning*-Steuerung eine realistische Anwendung im Straßenverkehr der Zukunft? Wohin geht der Trend derzeit?
- Welche laufenden Entwicklungen und Forschungsprojekte sind Ihnen bekannt?
- Wie wird das Thema im AA behandelt?
- Inwiefern muss die RILSA hierfür aktualisiert werden?
- Sind Simulationsstudien ein hilfreiches Werkzeug für den AA 3.3?
- Inwiefern können die Ergebnisse aus dem Projekt LSS zum Fortschritt aus Sicht des AA 3.3 beitragen?
- Welchen Fokus sollten zukünftige Forschungsaktivitäten haben?

### 9.5.3. AA 3.10 Theorie des Straßenverkehrs

- Wie können die Auswirkungen von AVF auf die Leistungsfähigkeit städtischer Netze besser abgeschätzt werden?
- Welche Untersuchungsansätze sind hierfür sinnvoll (Analytisch, makroskopische, mesoskopische, mikroskopische Modelle, Feldtests)?
- Welche laufenden Entwicklungen und Forschungsprojekte sind Ihnen bekannt?
- Ist geplant, dieses Thema auch im AK 3.10.1 zu behandeln?
- Wurde bereits spezifischer Handlungsbedarf bzgl. der Überarbeitung von FGSV-Regelwerken identifiziert?
- Inwiefern können die Ergebnisse aus dem Projekt LSS zum Fortschritt aus Sicht des AA 3.10 beitragen?
- Wie kann eine allgemeine Aussage auf Basis von Simulationsstudien getroffen werden?
- Wie kann eine Simulationssoftware-unabhängige Aussage getroffen werden?
- Welchen Fokus sollten zukünftige Forschungsaktivitäten haben?
- Was sind Methoden, die sich eignen, um offene Fragen hinsichtlich der Auswirkungen von AVF untersuchen zu können?
- Welchen Fokus sollten zukünftige Forschungsaktivitäten haben?

### 9.5.4. AA 3.13 Theorie des Straßenverkehrs

- Welche Auswirkung haben AVF auf die Verkehrsqualität in städtischen Netzen?
- Welche laufenden Entwicklungen und Forschungsprojekte sind Ihnen bekannt?
- Wie wird das Thema im AA behandelt?
- Wo muss das HBS am dringendsten angepasst werden?
  - Müssen die Metriken angepasst werden?
  - Werden manche Kapitel hinfällig?
  - Muss das Thema in die „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ ausgelagert werden?
- Ist der im LSS-Projekt vorgeschlagene Ansatz von Korrekturfaktoren zielführend?
- Inwiefern können die Ergebnisse aus dem Projekt LSS zum Fortschritt aus Sicht des AA 3.13 beitragen?
- Welche nächsten Aspekte in der Anpassung des HBS sollten im Fokus stehen?
- Welche Forschungsmethoden sollten hierbei angewandt werden?

## 9.6. Ergebniskatalog

<b>Arbeitspaket</b>	<b>Kategorie</b>	<b>Unterkategorie</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>
AP1 Grundlagenermittlung	<i>Rechercheergebnis</i>	Wichtigste Eigenschaften von AVF für deren mikroskopische Modellierung	Die wichtigsten Eigenschaften für die Modellierung von AVF in Verkehrsflusssimulationen sind der Automatisierungsgrad, das longitudinale und laterale Fahrverhalten, die Sensorik und Aktorik, zu berücksichtigende Rahmenbedingungen aus der Verkehrsordnung, sowie die Vernetzung und Kooperation der Fahrzeuge.
	<i>Rechercheergebnis</i>	Überblick über Fahrzeugfolgemodelle für AVF	Die wichtigsten Modelle für das Fahrzeugfolgeverhalten von AVF sind: intelligent driver model (IDM), microscopic model for simulation of intelligent cruise control (MIXIC), adaptive cruise control (ACC), cooperative adaptive cruise control (CACC), IDM+; Anpassungen von Modellen für menschliche Fahrer, z.B.: Wiedemann99 und Krauß.
	<i>Rechercheergebnis</i>	Überblick über Fahrstreifenwechselmodelle für AVF	Die wichtigsten Modelle für das Fahrstreifenwechselverhalten sind: CACC; Anpassungen von Modellen für menschliche Fahrer (wie z.B.: VISSIM-Modell und Erdmann).
	<i>Rechercheergebnis</i>	Überblick über Wirkungen von AVF	Nicht nur das Verkehrssystem, auch angrenzende Systeme werden beeinflusst (z.B.: Landnutzung). Viele Publikationen behandeln die Effekte auf Verkehrssysteme außerorts. Ein Großteil der Studien geht dort von Leistungssteigerungen aus. Auch innerorts werden Steigerungen erwartet, der Fokus liegt jedoch auf der Steuerung einzelner Knotenpunkte bei sehr hohen Durchdringungsgraden. Für urbane Straßennetze mit Wechselwirkungen zwischen Strecken und Knotenpunkte gibt es bislang keine Erkenntnisse über Wirkungen.

Leistungssteigerung städtischer Straßennetze: Schlussbericht

<b>Arbeitspaket</b>	<b>Kategorie</b>	<b>Unterkategorie</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>
AP1 Grundlagenermittlung	<i>Ergebnissynthese</i>	Identifizierte Forschungslücke	Es wurden bisher Verkehrssysteme außerorts in den Fokus gestellt. Innerorts wurden nur vereinfachte, artifizielle Netze und Kreuzungen betrachtet. Eine systematische Betrachtung von realistischen Streckenzügen innerorts ist daher im Zusammenhang mit den Auswirkungen von AVF auf die Leistungsfähigkeit solcher Systeme eine Forschungslücke.
	<i>Ergebnissynthese</i>	Drei Zukunftsszenarien	Auf Basis der Recherche wurden drei Zukunftsszenarien spezifiziert: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Konservativ: Durchdringungsgrad AVF von 33% ohne spezifische Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen</li> <li>- Innovativ: Durchdringungsgrad AVF von 66% ohne und mit Sonderfahrstreifen für AVF</li> <li>- Visionär: Durchdringungsgrad AVF von 95% mit verkehrsadaptiver Reinforcement-Learning-basierter Verkehrssteuerung</li> </ul>
AP2 Verkehrstechnische Berechnungen	<i>Modellerstellung</i>	Vier Streckenzüge in München und Ingolstadt	Es wurden vier Streckenzüge in München und Ingolstadt identifiziert, welche die Straßenverkehrsinfrastruktur in deutschen Städten gut repräsentieren. Diese wurden auf Basis einer eingängigen Analyse ausgewählt und in Modellen abgebildet.
	<i>Modellerstellung</i>	Eine Kreuzung in Ingolstadt	Zusätzlich wurde eine einzelne Kreuzung modelliert (in Ingolstadt verortet), um die Indikatoren der Sättigungsverkehrsstärke und der Rückstaulänge isoliert betrachten zu können.
	<i>Modellerstellung</i>	Ein fiktiver kurzer Streckenzug	Ein kurzer, fiktiver Streckenzug wurde im Zuge einer intensiven Analyse der Effekte von AVF-Fahrstreifen modelliert.
	<i>Berechnungsergebnis</i>	Analysen von Fundamentaldiagramme	Für alle Streckenzüge wurden für die definierten drei Zukunftsszenarien die Fundamentaldiagramme abgeschätzt, um die Einflüsse von AVF und ggf. eingesetzten Verkehrsmanagement- und -steuerungsmaßnahmen auf die Leistungsfähigkeit abzuschätzen. Im Vergleich zum Basisszenario ergaben sich für das konservative Szenario Steigerungen der Kapazität bis zu 15%, im innovativen Szenario bis zu 40% und im visionären Szenario bis zu 150%.
	<i>Berechnungsergebnis</i>	Analysen von Sättigungsverkehrsstärken	Zusätzlich wurde die Sättigungsverkehrsstärke ausgewertet. Im Vergleich zum Basisszenario, ändert sich jene um einen Faktor 0,96 - 1,07 im konservativen Szenario und um einen Faktor 0,63 - 1,05 im innovativen Szenario. Für das visionäre Szenario wurde dieser Indikator nicht ausgewertet, da die Reinforcement-Learning-basierte Verkehrssteuerung ohne Umlaufzeiten arbeitet.
	<i>Berechnungsergebnis</i>	Analysen von Rückstaulängen	Zusätzlich wurden die Rückstaulängen ausgewertet. Für das konservative Szenario ergaben sich Veränderungen im Vergleich zum Basisszenario um einen Faktor 0,88 - 0,99 und im innovativen Szenario um 0,94 - 1,01. Für das visionäre Szenario wurde dieser Indikator nicht ausgewertet, da die Reinforcement-Learning-basierte Verkehrssteuerung ohne Umlaufzeiten arbeitet.
	<i>Reflexionsergebnis</i>	Kritische Reflexion des Vorgehens	Es wurde kritisch reflektiert und festgestellt, dass die gewählten Modelle großen Einfluss auf die Ergebnisse haben, sowie dass gewisse Aspekte nicht explizit modelliert wurden (z.B.: Kommunikation und Kooperation zwischen den Fahrzeugen).
	<i>Präsentation</i>	Poster auf dem Deutschen Straßen- und Verkehrskongress	Auf dem DSVK der FGSV wurden die Ergebnisse zu den drei Zukunftsszenarien für einen Streckenzug als Beispiel präsentiert.

<b>Arbeitspaket</b>	<b>Kategorie</b>	<b>Unterkategorie</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>
AP2 Verkehrs- technische Berechnungen	<i>Präsentation</i>	Präsentation auf dem 4th Symposium on Management of Future Motorway and Urban Traffic Systems 2022	Auf der MFTS wurde die vertiefte Studie zum Einfluss von dezidierten Fahrstreifen für AVF in einem fiktiven Streckenzug vorgestellt.
AP3 Entwicklung von Handlungsempfehlungen	<i>Interviewergebnis</i>	Kritische Reflexion des Modells	Es wurde darauf hingewiesen, dass die Modellannahmen explizit auszuweisen sind, da jene einen substanziellen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Zudem wurde nahegelegt, dass konservative Modellannahmen realistischer sein können.
	<i>Interviewergebnis</i>	Kalibrierung der Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodelle	Es wurde vorgeschlagen, dass die Modelle in Zukunft zusammen mit Autoherstellern kooperativ kalibriert und validiert werden könnten. Somit könnten realistischere Modelle für das Fahrverhalten gefunden werden. Zudem bedarf es einer eingehenden Kalibrierung der Modelle, sobald genügend empirische Daten zur Verfügung stehen. Da dies derzeit noch nicht möglich ist, sind präzise Vorhersagen nur schwer zu treffen.
	<i>Interviewergebnis</i>	Aufnahme von AVF-Aspekten in das HBS	Es wurde darauf hingewiesen, dass in den Regelwerken der FGSV nur der etablierte Stand der Technik dargestellt werden sollte. D.h., um AVF-Aspekte einfließen zu lassen, muss eine entsprechende empirische Datenbasis vorhanden sein. Aufgrund der derzeit noch fehlenden empirischen Daten würden die meisten der befragten Fachleute das Thema AVF im Kontext der Fortschreibung des HBS nicht zu hoch priorisieren. Es wurde angemerkt, dass es der Zweck des HBS ist, einfache Handchenverfahren für die Anwendung bereitzustellen. Es wurde größtenteils angezweifelt, dass sich AVF-Ansätze diesem Grundsatz folgend in das HBS integrieren lassen. Allerdings wurde das Konzept von Korrekturfaktoren als geeignet beurteilt, vor allem für übergeordnete Abschätzungen.
	<i>Interviewergebnis</i>	Aufnahme von AVF-Aspekten in die Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation	Es wurde angemerkt, dass die offengelegte Problematik der AVF-Fahrverhaltensmodelle Einfluss auf die Fortschreibung der "Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation" haben könnte. D.h., in dieses Hinweispapier könnten z.B. Vorschläge für entsprechende Modelle sowie deren Parametrisierung eingebracht werden. Dadurch könnte das Thema entsprechend seiner Komplexität behandelt werden.
	<i>Interviewergebnis</i>	Aufnahme von AVF-Aspekten in die RILSA	Zu den Auswirkungen von AVF auf die Planung von Lichtsignalanlagen wurden nur wenige Impulse gegeben. Es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass die dann vorherrschende, wesentlich verbesserte Datenlage die Bemessung der LSA maßgeblich erleichtern könnte.

Leistungssteigerung städtischer Straßennetze: Schlussbericht

Arbeitspaket	Kategorie	Unterkategorie	Kurzbeschreibung
AP3 Entwicklung von Handlungsempfehlungen	FGSV-Regelwerksanalyse	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen	Folgende Aspekte des HBS wurden im Vorfeld der Interviews in Hinblick auf AVF analysiert: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verkehrsnachfrage: AVF sollten als eigene Fahrzeugklasse aufgenommen werden, um in späteren Berechnungen explizit berücksichtigt werden zu können.</li> <li>- Verkehrsqualität auf Strecken: Die Fundamentaldiagramme müssen neu spezifiziert werden. Dies gilt auch für den Einfluss von Bushalte- und Parkvorgängen. Die Definition der Qualitätsstufen muss überarbeitet werden.</li> <li>- Verkehrsqualität an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen: Der Zeitbedarfswert und die entsprechenden Anpassungsfaktoren müssen überarbeitet werden. Die Kapazitätskennwerte für unbehinderten Abfluss, Links- und Rechtsabbiegeströme und für weitere Spezialfälle müssen überarbeitet werden. Die Vorgehensweise zur Berücksichtigung von Kolonnenbildung muss überarbeitet werden. Die Definition der Qualitätsstufen muss überarbeitet werden.</li> <li>- Verkehrsqualität an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen: Die Grenz- und Folgezeitlücken müssen überarbeitet werden. Die Definition der Qualitätsstufen muss überarbeitet werden.</li> <li>- Angebotsqualität eines Netzabschnitts: Die Definition der Stufen der Angebotsqualität muss überarbeitet werden.</li> </ul>
	FGSV-Regelwerksanalyse	Richtlinien für Lichtsignalanlagen	Folgende Aspekte der RILSA wurden im Hinblick auf AVF analysiert: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Übergangszeiten: Es ist zu untersuchen, inwiefern sich die Übergangszeiten in Abhängigkeit vom Durchdringungsgrad verringern ließen.</li> <li>- Steuerungsverfahren: Für verkehrsabhängige Steuerungsverfahren kann die verbesserte Datenlage zu einem effizienteren Ablauf führen. Dies müsste entsprechend beschrieben werden.</li> </ul>
	FGSV-Regelwerksanalyse	Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation	Die mikroskopische Verkehrsflusssimulation wird zentral für die Bewertung der Verkehrsqualität mit Bezug zu AVF sein. Es müsste daher abgestimmt und tiefer untersucht werden, ob geeignete Modellgruppen und Parametrisierungen in die Hinweise aufgenommen werden können.
	FGSV-Regelwerksanalyse	Hinweise zum Fundamentaldiagramm	Mehrere Aspekte des Fundamentaldiagramms werden sich ändern, sobald signifikante Durchdringungsgraden von AVF im Verkehr vorhanden sind. Dazu gehört die Form bzw. der abstrahierte Kurvenverlauf, d.h. veränderte Verkehrsflüsse bei gegebenen Verkehrsdichten werden auftreten. Bei einer konservativen Fahrweise können sich die Flüsse verringern, bei einer aggressiveren werden die Flüsse erhöht. Zudem werden die gemessenen Werte weniger Streuung aufweisen, da das Fahrverhalten homogener sein wird. Die Umfeldeinflüsse auf das Fundamentaldiagramm müssten überarbeitet werden.
	FGSV-Regelwerksanalyse	Beispielrechnung	Anhand eines Beispiels wird gezeigt, wie geeignete Korrekturfaktoren für AVF im Fundamentaldiagramm zur Bewertung der Verkehrsqualität für Strecken angewendet werden können. Dieses Beispiel basiert auf den aufgestellten Simulationsmodellen.
	Ergebnissynthese	Handlungsempfehlungen für die Forschung	Es wurden folgende zukünftige Forschungsfelder identifiziert: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Empirische Daten: um die Fahrverhaltensmodelle zu verfeinern, benötigt es mehr empirische Daten aus Realversuchen mit AVF.</li> <li>- Simulatoren und Testfelder: Alternativ können solche Daten aus Simulatorstudien und von Testfeldern bezogen werden.</li> <li>- Einbindung von Automobilherstellern: Die Einbindung von Automobilherstellern in kooperative Forschungsprojekte wird zu qualitativ hochwertigeren Modellen führen.</li> <li>- Zulässige Betriebsbereiche: Es muss untersucht werden, wie zulässige Betriebsbereiche im urbanen Raum aussehen können.</li> <li>- Kommunikation und Kooperation: Die explizite Einbindung von Kommunikationsmodellen und deren Koppelung mit Verkehrsflussmodellen kann zu weiteren Erkenntnissen führen.</li> </ul>

<b>Arbeitspaket</b>	<b>Kategorie</b>	<b>Unterkategorie</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>
	<i>Ergebnissynthese</i>	Handlungsempfehlungen für die Praxis	<p>Es wurden folgende Anwendungshinweise zur Modellierung von AVF in der Praxis erarbeitet:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Simulation: Aufgrund der Komplexität der Thematik ist die mikroskopische Simulation als Verfahren zur Abbildung von AVF-Funktionen, zur Wirkungsanalyse und Bewertung zu bevorzugen. Es sollten Standardmodelle und Parametersätze untersucht und festgelegt werden, die dann für eine praxisnahe Untersuchung angewandt werden können.</li> <li>- Korrekturfaktoren: Sobald auf Basis empirischer Daten Korrekturfaktoren berechnet werden können, sollten diese für übergeordnete Fragestellungen verwendet werden.</li> </ul>