



# **Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 5: Mischverkehr**

**Effets de la conduite automatisée: Projet partiel 5:  
Trafic mixte**

**Impact of automated driving, Subproject 5:  
mixed traffic**

**TU München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik  
Fritz Busch  
Sabine Krause  
Fabian Fehn**

**Gruner AG, Abteilung Verkehrsplanung, Verkehrstechnik  
Marco Richner  
Stefan Armbruster  
Thomas Winzer**

**Forschungsprojekt ASTRA 2018/005 auf Antrag des Bundesamtes für  
Strassen ASTRA**

**Oktober 2020**

**1684**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



# **Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 5: Mischverkehr**

**Effets de la conduite automatisée: Projet partiel 5:  
Trafic mixte**

**Impact of automated driving, Subproject 5:  
mixed traffic**

**TU München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik**  
**Fritz Busch**  
**Sabine Krause**  
**Fabian Fehn**

**Gruner AG, Abteilung Verkehrsplanung, Verkehrstechnik**  
**Marco Richner**  
**Stefan Armbruster**  
**Thomas Winzer**

**Forschungsprojekt ASTRA auf Antrag des Bundesamtes für Strassen**  
**ASTRA**

**Oktober 2020**

**1684**

# Impressum

## Forschungsstelle und Projektteam

### Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch  
Marco Richner

### Mitglieder

Sabine Krause  
Stefan Armbruster  
Fabian Fehn  
Dr.-Ing. Thomas Winzer

## Begleitkommission

### Präsident

Erwin Wieland

### Mitglieder

Annette Antz, SBB Netzentwicklung Zentrale  
Thierry Chanard, GEA valloetton et chanard sa  
Christian Egeler, Bundesamt für Raumentwicklung  
Burkhard Horn, Mobilität & Verkehr - Strategie & Planung  
Dr. Arnd König, Amt für Verkehr, Kanton Zürich  
Alexander Lehrmann, Sunrise Communications AG  
Markus Liechti, Bundesamt für Verkehr  
Martina Mügglar, PostAuto, Mobilitätslösungen  
René Neuenschwander, Ecoplan AG  
Dr.-Ing. Thomas Sauter-Servaes, ZHAW School of Engineering  
Prof. Dr. Dirk Bruckmann, Hochschule Rhein-Waal

## Antragsteller

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

## Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

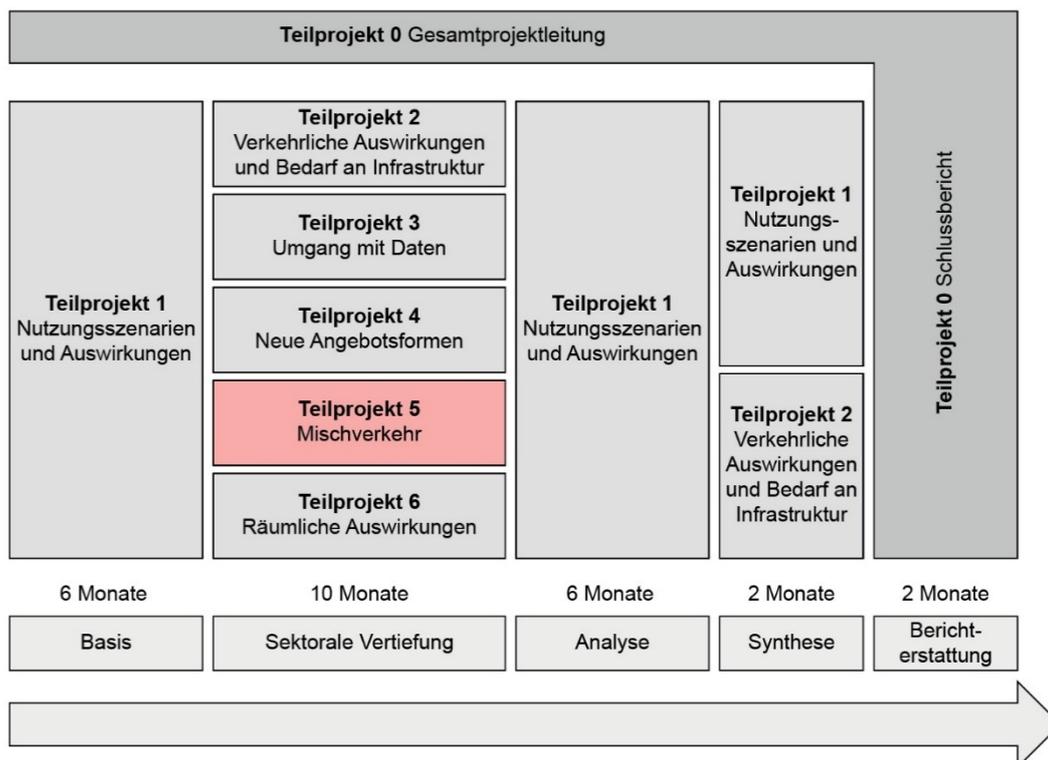
# Inhaltsverzeichnis

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>15</b>
<b>Summary</b> .....	<b>23</b>
<b>1 ASTRA-Forschungspaket Auswirkungen des automatisierten Fahrens</b> .....	<b>31</b>
1.1 Ausgangslage .....	31
1.2 Ziel und Zweck des Forschungspakets.....	31
1.3 Struktur des Forschungspakets .....	32
1.3.1 Teilprojekte .....	32
1.3.2 Abgrenzung zu Verkehr der Zukunft 2060 .....	33
<b>2 Fragestellung und Ziele des Teilprojekts 5</b> .....	<b>35</b>
2.1 Fragestellung TP5.....	35
2.2 Ziel des TP5 .....	35
2.3 Methodisches Vorgehen .....	36
2.3.1 Definition der Automatisierungsgrade und Abgrenzung in TP5.....	37
2.3.2 Zusammenhänge der Szenarien und Modelle im Rahmen des Gesamtprojekts .....	39
2.3.3 Abhängigkeiten und Interaktion zwischen den TP .....	41
<b>3 Stand der Forschung – Auswirkungen des automatisierten Fahrens</b> .....	<b>43</b>
3.1 Forschungsinitiativen und themenverwandte Projekte in Deutschland und der Schweiz.....	43
3.2 Einschätzung der Durchdringung und Marktreife des automatisierten Fahrens.....	44
3.3 Treiberanalyse zur vertieften Einschätzung der Durchdringung und Marktreife des automatisierten Fahrens .....	47
3.3.1 Primärtreiber.....	51
3.3.2 Sekundärtreiber.....	54
3.4 Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems im Mischverkehr zwischen automatisierten und konventionellen Fahrzeugen .....	57
<b>4 Verfassen der Migrationsszenarien</b> .....	<b>59</b>
4.1 Methodik.....	59
4.2 Allgemeine Einflüsse auf die Flottenzusammensetzung .....	60
4.3 Flottenmodell.....	60
4.3.1 Randbedingungen des Modells .....	61
4.3.2 Bevölkerungsentwicklung, Motorisierung und Güterverkehrsleistung .....	62
4.3.3 Annahmen zu zukünftigen Neuzulassungen.....	63
4.3.4 Fahrzeugalterung .....	64
4.3.5 Einführung des automatisierten Fahrens .....	65
4.4 Szenarien Personenwagen .....	66
4.4.1 Trendszenario Personenverkehr.....	67
4.4.2 Pro Sharing-Szenario Personenverkehr .....	68
4.4.3 Extremszenario Pro Sharing Personenverkehr.....	69
4.4.4 Extremszenario Trend Personenverkehr .....	71
4.5 Szenarien Güterverkehr .....	72
4.5.1 Trendszenario Güterverkehr .....	72
4.5.2 Extremszenario Trend Güterverkehr.....	73
4.6 Bewertung der Szenarien.....	74
4.6.1 Annahmen und Effekte im Flottenmodell .....	75

<b>5</b>	<b>Zeitliche Strassenfreigabe für automatisiertes Fahren .....</b>	<b>77</b>
5.1	Zuordnung der Strassentypen aus funktionaler Sicht.....	77
5.1.1	Modifikation der Strassentypen .....	78
5.1.2	Räumliche Unterteilung.....	80
5.2	Eignung von unterschiedlichen Strassentypen.....	80
5.2.1	Schrittweise Freigabe der Strassentypen.....	83
5.2.2	Funktionale Strassennutzung .....	84
5.3	Einfluss des Automatisierungsgrades sowie der Antriebstechnik auf die PCU.....	86
<b>6</b>	<b>Auswertung und Interpretation der MATSim-Umlegungen .....</b>	<b>89</b>
6.1	Raumdifferenzierte Auswertung der Durchdringung mit Fokus Schweiz .....	91
6.2	Raumdifferenzierte Auswertung der Durchdringung mit Fokus auf den Teilraum Zürich .....	95
6.3	Strassendifferenzierte Auswertung der Durchdringung mit Fokus auf den Teilraum Zürich .....	101
<b>7</b>	<b>Analyse der besonderen Herausforderungen und Lösungsvorschläge.....</b>	<b>105</b>
7.1	Auswahl von Beispielstrecken .....	105
7.2	Beschreibung der Beispielsräume und Strassen .....	106
7.3	Sicherheit im Mischverkehr.....	110
7.3.1	Methodik und Vorgehen.....	111
7.3.2	Analyse und Typisierung der Unfälle .....	111
7.3.3	Abschätzung des Beitrags der Automatisierung zur Unfallvermeidung .....	113
7.3.4	Abschätzung des Beitrags der Automatisierung zur Unfallentstehung .....	119
7.3.5	Massnahmenfelder zur Erhöhung der Sicherheit .....	121
7.4	Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems .....	122
7.4.1	Definition und Abgrenzung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems .....	123
7.4.2	Indikatoren zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems.....	123
7.4.3	AF-induzierte Effekte bzgl. Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems .....	133
7.4.4	Massnahmenfelder zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems .	136
<b>8</b>	<b>Handlungsempfehlungen und Grundlagen für die Wirkungsanalyse.....</b>	<b>141</b>
8.1	Handlungsempfehlungen zuhanden der Infrastrukturbetreiber .....	141
8.1.1	Regulatorische Massnahmen .....	143
8.1.2	Bauliche Massnahmen.....	146
8.1.3	Betriebliche Massnahmen.....	151
8.1.4	Überblick über die Massnahmen und Definition der Zuständigkeiten .....	153
8.2	Zusammenhänge zwischen den Wirkungen durch AF und den Massnahmenfeldern ...	155
8.3	Wirkungsanalyse - Ergebnisse des TP5.....	157
<b>9</b>	<b>Weiterer Forschungsbedarf.....</b>	<b>161</b>
	<b>Anhänge.....</b>	<b>163</b>
	<b>Glossar.....</b>	<b>171</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>173</b>
	<b>Projektabschluss .....</b>	<b>177</b>
	<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen .....</b>	<b>180</b>

## Zusammenfassung

Innerhalb des Verkehrswesens stellt das automatisierte Fahren – getrieben durch die Fahrzeug- und IT-Industrie – eines der zentralen Zukunftsthemen dar. Die Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen (AF) auf die Mobilität und den Raum stellen insbesondere auch die öffentliche Hand vor entsprechend grosse Herausforderungen. Im Bewusstsein dessen, hat das Bundesamt für Strassen ASTRA ein Forschungspaket initialisiert, welches sich in insgesamt fünf Teilprojekten (TP) mit diesem Thema auseinandersetzt. Die inhaltliche Verzahnung der Teilprojekte 2 bis 6 (vgl. Abb. Z-1) ist dabei ebenso vorgesehen wie auch die Nutzung der jeweiligen Teilergebnisse für das vor- und nachgelagerte Teilprojekt 1, bei welchem ein «finales» Nutzungsszenario festgelegt werden soll.



**Abb. Z-1** Übersicht Forschungspaket mit seinen Teilprojekten (Ausschreibung ASTRA)

Das Teilprojekt 5 befasst sich mit der Frage der zeitlichen und räumlichen Durchdringung automatisierter Fahrzeuge (Level 4 und 5) und dem Einfluss eines Mischbetriebs auf die Sicherheit und die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems. Ziel dieses Teilprojekts ist es, neben der Abschätzung der zeitlich/räumlichen Durchdringung von AF, Handlungsempfehlungen für die Infrastrukturbetreiber abzugeben. Dabei erfolgt eine zeitliche Betrachtung zwischen 2020 und 2050 mittels 10-Jahres Zeitschritten.

Zu Beginn der Untersuchungen des TP5 wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, welche die Grundlage zu den im weiteren Verlauf getroffenen Annahmen und durchgeführten Untersuchungen bildet. Dabei wurde vor allem auf die Marktreife von automatisierten Fahrzeugen sowie deren Durchdringung in der Fahrzeugflotte, aber auch auf aktuelle Forschung in den Bereichen «Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems» und «Sicherheit im Mischverkehr» eingegangen. Die Analyse verschiedener Quellen ergab im Hinblick auf die Durchdringung von AF in der Fahrzeugflotte sehr unterschiedliche Einschätzungen und insbesondere für den Zeitschritt 2050 eine sehr grosse Spannweite der Ergebnisse. Dies verdeutlicht die grossen Unsicherheiten hinsichtlich der Prognosen. Nicht zuletzt, da sowohl der Zeitpunkt, ab welchem automatisierte Fahrzeuge eine technische Reife für eine Zulassung erlangen, unbekannt ist, als auch die Kaufbereitschaft dieser automatisierten Fahrzeuge schwer prognostiziert werden kann. In einem nächsten Schritt wurde eine Treiberanalyse durchgeführt, welche es erlaubt, auf Basis der Erkenntnisse aus

der Literaturrecherche und eigener Einschätzungen die identifizierbaren Treiber in Primär- und Sekundärtreiber einzuteilen. Die Primärtreiber, welche einen relevanten Einfluss auf die Durchdringung der AF in der Fahrzeugflotte und deren Verfügbarkeit haben, sind die «technische Verfügbarkeit», die «Haftungs- und Versicherungsfragen», die «Nutzungsform» und die «Investitionskosten». Die wesentlichen Sekundärtreiber, die die Rahmenbedingungen für die Marktdiffusion von AF bilden, sind die «räumliche Regulierung bzw. Zulassung», «Ausstattung der Strasseninfrastruktur» sowie die «Strassennutzbarkeit».

Die Treiberanalyse bildet eine der Grundlagen für die im Flottenmodell getroffenen Annahmen zu beispielsweise Technologieverfügbarkeit, räumlicher Regulierung und Zulassung von AF, welche wiederum einen zentralen Einfluss auf Nutzungsdauer bzw. Alterung und somit die Durchdringungsgeschwindigkeit von AF in der Schweizer Fahrzeugflotte haben. Auf Basis von Annahmen zur Ausprägung verschiedener Treiber wurden Migrationsszenarien verfasst, welche – unter der Annahme, dass ab 2025 die ersten automatisierten Fahrzeuge (Level 4) verfügbar sein werden – für die Zeitschritte (2030, 2040 und 2050) mittels eines Kohortenmodells modelliert wurden. Mithilfe dieses eigens entwickelten Flottenmodells wurden anhand verschiedener Szenarien die Anteile der unterschiedlichen Angebotsformen der AF in der Schweizer Fahrzeugflotte und deren Entwicklung über die Zeit abgeschätzt und quantifiziert. Dabei wurde sowohl ein Trend-, als auch ein Pro Sharing-Szenario mit jeweils korrespondierenden Extremszenarien ausgearbeitet.

Um die zeitlich-räumliche Durchdringung von automatisierten Fahrzeugen zu bewerten, ist neben dem Flottenmodell die Freigabe der Strassen für AF von zentraler Bedeutung. Dafür wurden massgebende Faktoren ermittelt und die zeitliche Abfolge der vollumfänglichen Nutzbarkeit unterschiedlicher Strassentypen durch AF-Level 4 prognostiziert. Dabei wird mit einer Freigabe der Hochleistungsstrassen (HLS) im Jahr 2030 (inkl. ausgewählter innerstädtischer Gebiete), aller städtischen Strassen im Jahr 2040 und der verbleibenden Strassen (Hauptverkehrsstrassen (HVS) ausserorts) im Jahr 2050 gerechnet. Diese Etappierung und Reihenfolge der Strassenfreigabe stützt sich sowohl auf Forschungsergebnisse Dritter als auch auf eigene Einschätzungen unter Berücksichtigung der massgebenden Einflussfaktoren.

**Tab. Z-1** Übersicht prognostizierte vollumfängliche Nutzbarkeit durch AF-Level 4 je Strassentypen

Strassentyp	Jahr	2020	2030	2040	2050
HLS (Autobahn)		✗	✓	✓	✓
HVS ausserorts (Landstrasse)		✗	✗	✓*	✓
ES/SS und HVS innerorts (Stadtstrassen)		✗	✓*	✓	✓

- ✓ vollumfängliche Nutzbarkeit AF-Level 4 in allen Räumen
- ✓\* räumlich eingeschränkte Nutzbarkeit AF-Level 4 auf ausgewählten Relationen oder Gebieten (z.B. Stadt Zürich für automatisierte Taxiflotten als Erstanwender 2030 oder z.B. Verbindungsstrecken zwischen HLS-Anschlüssen und bereits für AF nutzbaren Stadtstrassen 2040)
- ✗ Strassentyp ist für AF-Level 4 noch nicht nutzbar (Ausnahmen bilden Pilotstrecken)

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden gemeinsam mit den Annahmen zum Einfluss des Automatisierungsgrades sowie der Antriebstechnik auf die PCU (Passenger Car Unit) im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens an das TP2 zum Aufbau einer Verkehrssimulation in MATSim (Multi-Agent Transport Simulation Toolkit) für die gesamte Schweiz (CH) übergeben, um die Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf das zukünftige Verkehrsverhalten und die Verkehrsbelastung im Netz zu prognostizieren.

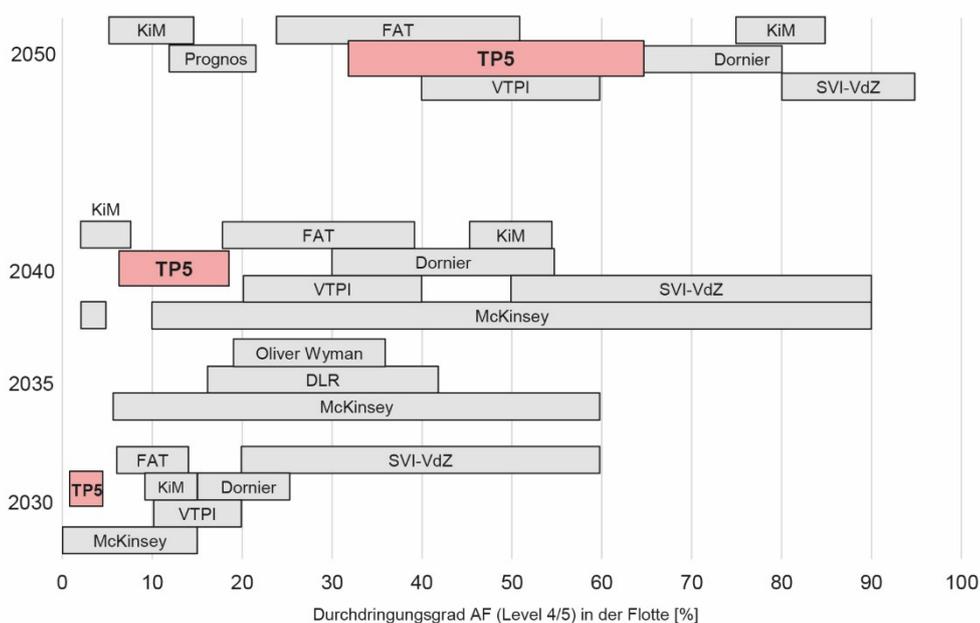
Neben der gestaffelten Strassenfreigabe für AF spielen der AF-Anteil und der Anteil der Sharing-AF für die zukünftige Verkehrsentwicklung eine wichtige Rolle. Dabei sind zwischen den beiden Szenarien durchaus signifikante Unterschiede festzustellen:

**Tab. Z-2** Errechnete Werte für den Bestand der Personenwagen (PW) der Schweizer Flotte nach den Annahmen des Flottenmodells je nach Szenario bis 2050

Jahr	2030	2040	2050
Trendszenario (Szenario A)			
Anzahl PW gesamt	5.391.441	5.708.928	5.591.856
Anteil AF gesamt	0,5 %	6,1 %	32,0 %
Extremszenario Pro Sharing (Szenario B)			
Anzahl PW gesamt	5.416.004	5.199.751	2.867.391
Anteil AF gesamt	2,0%	17,5%	62,2%

Insbesondere der Anteil der AF an der gesamten Flotte ist bei allen drei Zeitschritten beim Extremszenario Pro Sharing gegenüber dem Trendszenario jeweils rund doppelt so hoch. Dies ergibt sich durch eine schnellere Ablösung der konventionellen Fahrzeuge (Fz) aufgrund von mehr Sharing-Nutzungen. Zugleich wird deutlich, welches im Grunde hohe Potenzial zur Reduktion der Gesamtfahrzeugmenge im Schweizer Strassennetz durch das Instrumentarium «Einführung automatisierter Fahrzeuge inklusive entsprechender Dienste und regulativer Massnahmen» besteht. Gegenüber heute könnte die Anzahl der Personenkraftwagen in etwa halbiert werden (Extremszenario Pro Sharing).

Ein Vergleich mit anderen in- und ausländischen Studien zeigt, dass sich die ermittelten Werte – nachdem sie für die ersten Jahre eher geringer eingeschätzt werden – ab 2050 im Mittelfeld bewegen.



**Abb. Z-2** Vergleich der Ergebnisse der Durchdringung automatisierter Fahrzeuge in verschiedenen Studien (grau) und dem von TP5 entwickelten Flottenmodell (rot)

Die Analyse der MATSim-Ergebnisse zeigt, dass die AF-Anteile im Netz höher sind, als die in der Flotte, was eine vermehrte Nutzung der AF nahelegt und sich auch in der teilweise festgestellten Zunahme der Fahrleistung widerspiegelt.

**Tab. Z-3** Vergleich der AF-Anteile im Netz (MATSim) und in der Flotte (Flottenmodell)

Vergleich der AF-Anteile im Netz (MATSim) und in der Flotte (Flottenmodell)		2030	2040	2050
Szenario A (gesamte Schweiz)	AF-Anteil in der Flotte gemäss Flottenmodell	0,5 %	5,6 %	31,0 %
	mittlere AF-Anteile im Netz gemäss MATSim	0,6 %	6,9 %	37,9 %
Szenario B (gesamte Schweiz)	AF-Anteil in der Flotte gemäss Flottenmodell	1,5 %	13,1 %	47,6 %
	mittlere AF-Anteile im Netz gemäss MATSim	1,9 %	16,3 %	61,0 %

In Bezug auf die Auswirkungen auf die Sicherheit zeigt sich, dass basierend auf einer Auswertung der Unfälle auf Schweizer Strassen zwischen 2010 bis 2017 ein überwiegender Teil (96 %) der heutigen Unfälle durch Automatisierung der Fahraufgabe adressiert werden kann. Die restlichen 4 % sind teilweise oder nicht adressierbar. In Anbetracht, dass auch AF-induzierte neue Unfälle hinzukommen können, stellt die Reduktion der Unfälle mit 96 % ein als maximal zu bezeichnendes Vermeidungspotenzial dar. Dabei können die Reduktionen ebenfalls wieder nach Strassentyp, Zeitpunkt und nach den beiden Szenarien unterschieden werden.

**Tab. Z-4** Unfallvermeidungspotenzial durch automatisiertes Fahren nach Jahr, Strassentyp und MATSim-Szenario unter oben beschriebenen Annahmen

Szenario	HLS 2030	HLS 2040	HLS 2050
Trendszenario (Szenario A)	6 %	19 %	59 %
Extremszenario Pro Sharing (Szenario B)	7 %	34 %	82 %
Szenario	HVS 2030	HVS 2040	HVS 2050
Trendszenario (Szenario A)	5 %	21 %	57 %
Extremszenario Pro Sharing (Szenario B)	7 %	32 %	78 %
Szenario	ES 2030	ES 2040	ES 2050
Trendszenario (Szenario A)	5 %	17 %	46 %
Extremszenario Pro Sharing (Szenario B)	6 %	25 %	63 %

Eine grundsätzliche Problematik besteht darin, dass aktuell die exakte Leistungsfähigkeit und insbesondere Fehleranfälligkeit der komplexen Systemtechnik (Sensorik, Verarbeitung, Aktorik) von Level 4- (und Level 5) Fahrzeugen nur extrem vereinfacht angenommen werden kann. Als besondere Herausforderung mit noch nicht abschätzbarem, aber sicher sehr hohem Forschungs- und Entwicklungsaufwand zeichnet sich bereits heute die Abstimmung zwischen Mensch (als Fahrer, Fussgänger etc.) und Maschine (dem intelligenten Roboterfahrzeug) ab. Der insbesondere in zukünftigen urbanen, hochkomplexen Mischungsszenarien aus unterschiedlichsten Verkehrsmodi, automatischen und humanen Verhaltensweisen in wechselnden Infrastrukturen entstehende vieldimensionale «Handlungsraum» der Mobilität ist vermutlich eine langfristige Daueraufgabe. Insofern ist insbesondere in den Übergangszeiten mit geringeren Durchmischungsgraden und noch «junger», heterogener Automatisierungstechnik kaum von einem spürbaren Rückgang der Unfallzahlen auszugehen, allenfalls von einem «Ersatz» einiger vermiedener, leicht zu handhabender Unfalltypen durch neue Typen aufgrund fehlerhafter Technik oder noch nicht beherrschter komplexerer Verkehrssituationen.

Die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems wurde auf Basis einzelner Indikatoren untersucht und soweit möglich und sinnvoll quantifiziert. Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse je Indikator und die daraus abgeleiteten Tendenzen auf die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems tabellarisch dargestellt.

**Tab. Z-5 Einfluss von AF auf die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems**

Indikator zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems	Entwicklung des Indikators durch die Einführung von AF	
	Beschrieb der Entwicklungen, Chancen und Risiken und der zentralen Erkenntnisse bzgl. der Einführung von AF	Auswirkung
Qualität der Erreichbarkeit in Form von Reisezeitveränderungen	Die Reisezeiten auf einzelnen Relationen werden im Szenario A mit eher privat genutzten AF zu- und im Szenario B mit eher geteilt genutzten AF abnehmen.	
Zuverlässigkeit in Bezug auf die Reisezeit auf ausgewählten Relationen	Aufgrund der unterschiedlichen Nutzungsformen und Anteile der AF wird eine Abnahme der Zuverlässigkeit in Bezug auf die Reisezeit im Szenario A und eine Zunahme im Szenario B erwartet.	
Verfügbarkeit der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur	Die grundsätzliche Verfügbarkeit der Infrastruktur wird auch zukünftig gewährleistet sein, was einzelne Engpässe jedoch nicht ausschliesst.	
Qualität des Verkehrsablaufs in Bezug auf die Verkehrsdichte	Eine hohe Verkehrsdichte (kurze Fahrzeugfolgeabstände) durch AF erschweren das Queren starker MIV-Ströme durch den Langsamverkehr (LV). Die subjektive Verkehrswahrnehmung könnte sich zudem durch hohe Verkehrsdichten insbesondere für LV möglicherweise verschlechtern.	
Übergabebereiche zwischen automatisiert und konventionell befahrenen Perimetern	Die Regelung der Übergabe der Fahrfunktion von AF an den Menschen ist bzgl. Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems und Sicherheit herausfordernd und zu lösen, um AF-Level 4 optimal einsetzen zu können.	
Umwidmung, Optimierung und temporäre Zuteilung der vorhandenen Verkehrsflächen	Die Umgestaltung des Strassenraums aufgrund von AF bietet ein grosses Potenzial, was aber im Mischverkehr nur bedingt genutzt werden kann. Eine dynamische und tageszeitlich wechselnde Nutzung des Strassenraums bietet eine Möglichkeit, diesen im Hinblick auf die neuen Anforderungen durch AF gut zu nutzen.	
Einfluss von AF auf den ÖV-Anteil	Der bestehende Modal Split wird durch die neuen Angebotsformen der Automatisierung beeinflusst und es besteht die Gefahr einer nicht gewollten Reduktion der Anteile des klassischen öffentlichen Verkehrs (ÖV) nach heutiger Definition und einem Rückgang der LV-Anteile insbesondere im Szenario A.	
Einfluss von AF auf die Haltestelleninfrastruktur	Eine Zunahme der Ein- und Aussteiger auf innerstädtischen Strassen durch Sharing-AF wird insbesondere in Szenario B erwartet, was zu Konflikten zwischen PUDO- und ÖV-Haltevorgängen in diesen Bereichen führen kann.	
Einfluss auf den Langsamverkehr	Eine Kommunikation zwischen nicht automatisiertem LV und AF ist fast nicht möglich, was zu kritischen Situationen im Hinblick auf die Sicherheit führen kann und ggf. ein nicht optimal funktionierendes Verkehrssystem zur Folge hat. Zudem teilen sich LV und automatisierter GV voraussichtlich teilweise die gleichen Strassenbereiche, was bei einer Zunahme des automatisierten GV zu Konflikten führen kann.	

Daraus wurden auf Grundlage von drei unterschiedlichen Pilotstrassen (HLS im Raum Urdorf-Nord sowie zwei innerstädtischen Strassen in Zürich) die zukünftigen regulatorischen, betrieblichen und infrastrukturellen Anforderungen abgeleitet. Dabei zeigt sich insbesondere die Problematik des hier im Fokus stehenden Mischverkehrs. Solange dieser (in Bezug auf konventionell gesteuerte Fahrzeuge) vorhanden ist, kann das AF-induzierte Potenzial (bspw. Reduktion der Fahrstreifenbreite) nur sehr bedingt ausgeschöpft werden. Konkret können die erarbeiteten Handlungsempfehlungen den einzelnen Strassentypen und Akteuren wie folgt zugeordnet werden (Themenfelder mit hoher Priorität sind grün markiert).

**Tab. Z-6 Übersicht Handlungsempfehlungen nach Strassentypen und Zuständigkeiten**

Themenfelder	Beschreibung der unterschiedlichen Aspekte je Themenfeld	Strassentyp		Zuständigkeit / Lead		
		HLS	städt. Strasse	Bund	Kanton/ Stadt	Dritte
Zulassung/ Freigabe AF	Strassenfreigabe für AF			X		
	Kennzeichnung von AF			X		X
	Festlegung Freigabe für Nutzergruppen (bspw. Kinder)			X		X
	Festlegung Verhaltensweisen von AF (Ziel: Optimierung des Verkehrsflusses)			X		X
	Festlegung von Minimalstandards und Nachrüstung von Fz (L1 bis L3)			X		
	Verpflichtung zu regelmässigen Softwareupdates			X		
	Erstellen von HD-Karten			(X)	(X)	X
	Sicherstellung der Fahrkontrolle			X		X
	(Teil-)Sperrung der Strasse für konventionelle Fahrzeuge ab einem bestimmten AF-Anteil	X	X	X	X	
Testfelder/ Pilotanwendungen	Pilotstrecken HLS einrichten	X		X		
	Piloträume städtisches Netz einrichten		X		X	
	Testfeld(er) für Schweiz-spezifische Betriebszustände einrichten (z.B. Hochgebirgsstrassen, Zollanlagen etc.)	X	X	X	X	
(technische) Ertüchtigung Strecke/ Knoten	Ausrüsten der Infrastruktur unter Berücksichtigung zukünftiger Anforderungen (z.B. Leittechnik, Road-Side Unit, Markierungen, Fernüberwachung etc.)	X	X	X	X	
	Festlegung der zeitlichen Reihenfolge für die Umsetzung von erforderlichen Anpassungen an der Infrastruktur	X	X	X	X	
AF-Übergabeperimeter	Gestaltung der Schnittstellen erarbeiten	X	X	X	X	
	Lage der Schnittstellen HLS-HVS definieren	X		X	(X)	
	Lage der Schnittstellen im städtischen Netz definieren		X	X		
dynamische Flächenzuteilung	Anlage separater Fahrstreifen (FS) für AF prüfen und ggf. umsetzen	X		X		
	Festlegung zukünftiger Fahrstreifenbreiten	X	X	X	X	X
	Anzahl, Geometrie und räumliche Verteilung von Parkplätzen (PP) festlegen		X		X	
	Flächenzuteilung für neuartige Angebotsformen, insbesondere für nicht automatisierte Fz des LV klären (Ziel: verhaltenshomogene Verkehrsformen bündeln).		X		X	
	Anpassungen bzw. Ergänzungen der bestehenden Normierung	X	X	X		X
Verkehrsbeeinflussung (zeitlich, räumlich, modal)	Zulässige Geschwindigkeiten für AF definieren	X	X	X		
	Verkehrslenkung durch dynamische Bepreisung	X	X	X	X	
	Lenkung von Sharing-AF und Begrenzung von Leerfahrten			X	X	X
	Integration von AF in intermodale Wegeketten				X	X
	Einrichten von Bereichen für Mobilitätsdienstleistungen				X	X
PUDO-Bereiche	Definition von Lage und Anzahl		X		X	
	Regelung der Haltevorgänge zur Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems		X		X	

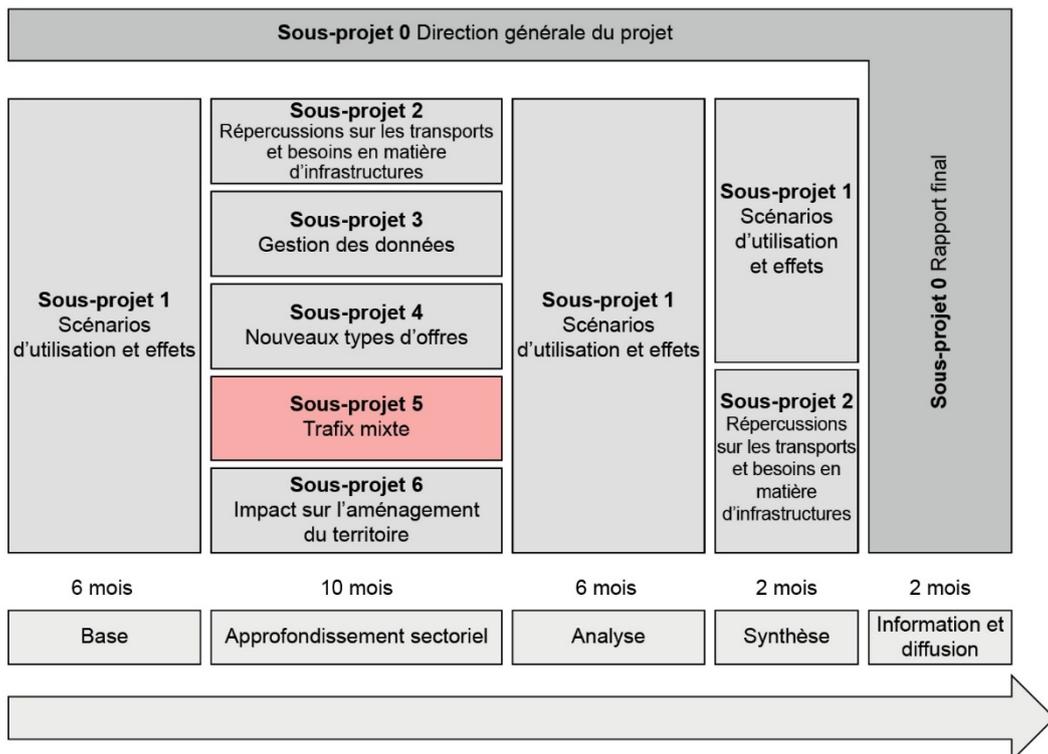
Der vorliegende Forschungsbericht «Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 5: Mischverkehr» zum Forschungsprojekt ASTRA 2018/005 beschäftigt sich mit der grundlegenden Frage der Durchdringung von AF in der Fahrzeugflotte (zeitlich/ räumlich) und den Effekten des automatisierten Fahrens auf die Infrastruktur, die Raumentwicklung sowie die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems und Sicherheit des Verkehrsablaufs.

Auch nach Abschluss dieses Forschungsprojektes bleiben noch verschiedene Aspekte im Zusammenhang mit den Fragestellungen dieses Arbeitspaketes offen bzw. ergeben sich aus den vorliegenden Erkenntnissen neue Fragestellungen, die es im Rahmen von weiteren Forschungspaketen zu bearbeiten und zu beantworten gilt. In diesem Zusammenhang wird insbesondere empfohlen, dass z.B. beim Bundesamt für Strassen ein kontinuierlicher, engmaschiger Monitoringprozess zum Thema «Einführung des automatisierten Fahrens» eingerichtet wird. Damit soll das Ziel verfolgt werden, dass der technische Fortschritt samt praktischen Erfahrungswerten kontinuierlich beobachtet wird und immer wieder auf die Erkenntnisse und Empfehlungen dieser Untersuchung reflektiert werden kann, um die erarbeiteten Massnahmen und Handlungsempfehlungen ggf. vertieft auszuarbeiten oder anzupassen, um so auf die Einführung des automatisierten Fahrens möglichst optimal vorbereitet zu sein.



## Résumé

Dans le secteur des transports, la conduite automatisée – portée par les industries automobile et informatique – est devenue l'un des enjeux majeurs de l'avenir. Les effets des véhicules automatisés (VA) sur la mobilité intelligente connectée et sur le territoire constituent un défi important, notamment pour les pouvoirs publics. Conscient de cela, l'Office fédéral des routes (OFROU) a initié un programme de recherche composé de cinq sous-projets (SP) traitant de cette thématique. Il y est prévu de mettre en relation les contenus des sous-projets 2 à 6 (cf. *fig. R-1*) les uns avec les autres et d'intégrer les résultats de chaque sous-projet au sous-projet 1 situé en amont et en aval dans le but de définir un scénario d'utilisation « définitif ».



**Fig. R-1** Aperçu du programme de recherche et de ses sous-projets (appel à propositions OFROU)

Le sous-projet 5 s'interroge sur la pénétration spatio-temporelle des véhicules automatisés (niveau 4 et 5) et sur l'impact possible d'un régime d'exploitation mixte sur la sécurité et la fonctionnalité du système de transport. L'objectif de ce sous-projet est de fournir aux exploitants de l'infrastructure routière des recommandations sur les mesures à prendre, en plus d'une estimation de la pénétration spatio-temporelle des VA. Pour ce faire, on observera l'évolution de la situation pour chaque décennie entre 2020 et 2050.

Au début des études menées dans le cadre du SP5, on a réalisé une recherche bibliographique approfondie destinée à servir de base aux hypothèses formulées en cours d'étude ainsi qu'aux recherches effectuées dans le même temps. L'accent y a été mis sur la maturité du marché des véhicules automatisés et leur pénétration dans le parc automobile, mais aussi sur les recherches en cours dans le domaine de la « fonctionnalité du système de transport » et de la « sécurité du trafic mixte ». L'analyse des différentes sources a révélé l'existence d'une grande diversité d'estimations en matière de pénétration des VA dans le parc automobile et de résultats très contrastés pour la période 2050. Cela illustre la grande incertitude qui règne dans le domaine prévisionnel. D'autant plus que l'on ignore encore à quel moment les véhicules automatisés atteindront la maturité technique nécessaire pour être admis et qu'il est difficile de prévoir dans quelle mesure les acheteurs potentiels seront disposés à investir dans ce type de véhicules. A l'étape suivante, on a mené une analyse permettant de classer les facteurs moteurs identifiables en facteurs moteurs primaires et secondaires sur la base des résultats issus de la recherche bibliographique et de nos propres estimations. Les principaux facteurs ayant une influence significative sur la pénétration des VA dans le parc automobile et sur leur disponibilité sont la « disponibilité technique », les « questions de responsabilité et d'assurance », le « mode d'utilisation » et les « coûts d'investissement ». Les principaux facteurs moteurs secondaires qui forment le cadre à la diffusion des VA sur le marché sont la « réglementation ou l'admission à l'échelle territoriale », « l'équipement de l'infrastructure routière » et la « facilité d'utilisation des routes ».

Les hypothèses formulées dans la modélisation du parc automobile en matière de disponibilité de la technologie, de réglementation et d'admission des VA sur le territoire helvétique s'appuient en partie sur l'analyse de ces facteurs moteurs qui, à leur tour, ont une influence majeure sur la durée de vie ou le vieillissement et, par là même, sur la vitesse de pénétration des VA dans le parc automobile suisse. Sur la base d'hypothèses émises sur les caractéristiques des différents facteurs moteurs, on a élaboré des scénarios de migration qui - en supposant que les premiers véhicules automatisés (niveau 4) soient disponibles dès 2025 - ont été modélisés par décennies (2030, 2040 et 2050) en se servant d'un modèle d'étude de cohorte.

A l'aide de ce modèle de parc spécialement conçu à cet effet, on a estimé et quantifié la part des différents types d'offres de VA dans le parc automobile suisse ainsi que leur évolution dans le temps en utilisant des scénarios différents. Pour ce faire, on a élaboré un scénario tendanciel et un scénario favorisant l'autopartage avec leurs scénarios extrêmes correspondants.

Outre la modélisation du parc, l'ouverture des routes à la circulation des VA est primordiale pour pouvoir évaluer la pénétration spatio-temporelle des véhicules automatisés. A cet effet, on a identifié les facteurs déterminants et estimé quelle pourrait être la chronologie d'un accès illimité des VA de niveau 4 à différents types de route. Selon toutes prévisions, les routes à grand débit (RGD) seront ouvertes aux VA en 2030 (y compris certaines zones situées en centre urbain), tandis que l'ensemble des routes urbaines le sera en 2040 et les routes restantes (routes principales (RP) hors localités) en 2050. Cet échelonnement et cette chronologie dans l'ouverture des routes reposent sur les résultats de recherches menées par des tiers ainsi que sur des évaluations propres tenant compte des facteurs d'influence déterminants.

**tab. R-1** Prévisions concernant l'accès illimité des VA de niveau 4 selon le type de routes

Type de route	Année	2020	2030	2040	2050
RGD (autoroute)		✗	✓	✓	✓
RP hors localités (routes de rase campagne)		✗	✗	✓*	✓
RD/RC et RP à l'intérieur des localités (routes urbaines)		✗	✓*	✓	✓

✓ **Accès illimité des VA de niveau 4 à tous types de routes et de zones**

✓\* Utilisation de VA de niveau 4 limitée à des itinéraires ou des zones de circulation préalablement désignés (par ex. ville de Zürich accessible au parc de taxis automatisés en tant que premiers utilisateurs à partir de 2030 ou sur les routes de liaison reliant les raccordements de RGD aux routes urbaines déjà accessibles aux VA dès 2040)

✗ Ce type de routes n'est pas encore accessible aux VA de niveau 4 (exceptés les tronçons pilotes)

Au cours de ce projet de recherche, on a transféré au SP 2 les connaissances acquises ainsi que les hypothèses émises sur l'influence du degré d'automatisation et du système de propulsion sur les U.V.P. (unité de véhicule particulier) en vue de réaliser une simulation du trafic en MATSim (Multi-Agent Transport Simulation Toolkit = simulation multi-agents de mobilité) pour l'ensemble de la Confédération helvétique (CH). L'objectif était de prévoir les effets de la conduite automatisée sur le comportement futur du trafic et la charge de celui-ci sur le réseau routier dans l'avenir.

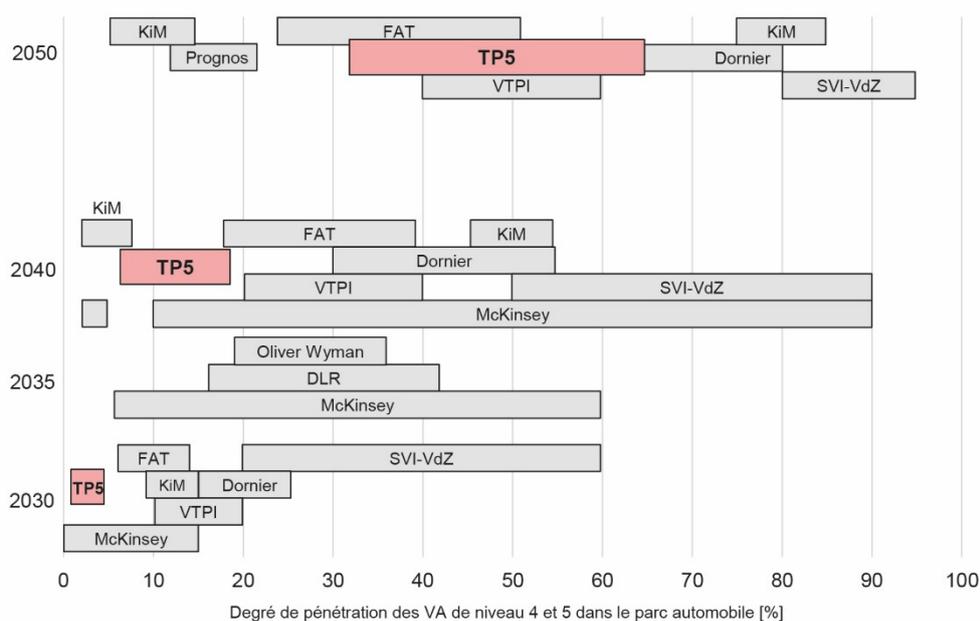
Outre l'échelonnement dans l'ouverture des routes à la conduite automatisée, la part des VA et celle des VA en autopartage sont appelées à jouer un rôle majeur dans l'évolution future du trafic. Il existe toutefois des différences significatives entre les scénarios en présence :

**tab. R-2** Calcul du parc des voitures de tourisme (VT) dans le parc automobile suisse par scénario d'après les hypothèses issues de la modélisation du parc

Année	2030	2040	2050
Scénario tendanciel (scénario A)			
Total VT	5'391'441	5'708'928	5'591'856
Part VA	0.5 %	6.1 %	32.0 %
Scénario extrême pro-autopartage (scénario B)			
Total VT	5'416'004	5'199'751	2'867'391
Part VA	2.0%	17.5%	62.2%

On constate en particulier que, sur l'ensemble des étapes du scénario extrême en faveur de l'autopartage, la part des VA dans le parc total est d'environ deux fois supérieure à celle prévue dans le scénario tendanciel. Ceci est dû à un remplacement plus rapide des véhicules traditionnels (VET) lié à un recours plus fréquent à l'autopartage. En même temps, il apparaît clairement que l'instrument dénommé « introduction de véhicules automatisés, de services et de mesures réglementaires correspondants » porte en lui un potentiel significatif de diminution du nombre total de véhicules circulant sur le réseau routier suisse. Selon le scénario extrême en faveur de l'autopartage, il serait possible de diminuer de près de 50% le nombre de voitures de tourisme actuellement en circulation.

Par rapport à d'autres études venant de Suisse et de l'étranger, les chiffres obtenus - après avoir été estimés à la baisse dans les premières années - se situeront dans la moyenne à partir de 2050.



**fig. R-2** Comparaison entre les résultats relatifs à la pénétration des véhicules automatisés tirés de différentes études (en gris) et la modélisation du parc automobile élaborée au SP5 (en rouge)

L'analyse des résultats de MATSim révèle que la part des VA sur le réseau routier est plus élevée que celle des VA dans le parc automobile, ce qui suggère un recours accru aux VA également reflété par l'augmentation partiellement observée des kilomètres parcourus.

**tab. R-3** Comparaison entre la part des VA sur le réseau routier (MATSim) et dans le parc auto (modèle parc)

Comparaison entre la part des VA sur le réseau routier (MATSim) et dans le parc (modélisation parc)		2030	2040	2050
Scénario A (ens. territoire CH)	Part des VA dans le parc d'après le modèle de parc	0.5 %	5.6 %	31.0 %
	Part moyenne des VA sur le réseau routier d'après MATSim	0.6 %	6.9 %	37.9 %
Scénario B (ens. territoire CH)	Part des VA dans le parc d'après le modèle de parc	1.5 %	13.1 %	47.6 %
	Part moyenne des VA sur le réseau routier d'après MATSim	1.9 %	16.3 %	61.0 %

A propos des effets sur la sécurité, on constate, d'après une évaluation des accidents survenus sur le réseau routier suisse entre 2010 et 2017, qu'il est possible de limiter la plupart (96 %) des accidents actuels en automatisant la tâche de conduite, les 4 % restants ne pouvant être résolus ou seulement en partie. Des accidents causés par les VA étant susceptibles de s'y ajouter, on estime le potentiel maximal d'évitement à 96 %. On peut également affiner cette estimation selon le type de routes, le moment de la journée et les scénarios en présence.

**tab. R-4** *Potentiel d'évitement d'accidents de la conduite automatisée selon l'année, le type de routes et le scénario MATSim d'après les hypothèses citées ci-dessus*

Scénario	RGD 2030	RGD 2040	RGD 2050
Scénario tendanciel (scénario A)	6 %	19 %	59 %
Scénario extrême pro-autopartage (scénario B)	7 %	34 %	82 %
Scénario	RP 2030	RP 2040	RP 2050
Scénario tendanciel (scénario A)	5 %	21 %	57 %
Scénario extrême pro-autopartage (scénario B)	7 %	32 %	78 %
Scénario	RD 2030	RD 2040	RD 2050
Scénario tendanciel (scénario A)	5 %	17 %	46 %
Scénario extrême pro-autopartage (scénario B)	6 %	25 %	63 %

Toutefois, un problème fondamental se pose: dans l'état actuel des choses, on ne peut avoir qu'une représentation très schématique de la performance exacte et notamment de la susceptibilité aux pannes de la technologie-système complexe (capteurs, processeurs, actionneurs) qui équipent les véhicules de niveau 4 et 5. Déjà aujourd'hui, la coordination entre l'homme (conducteur, piéton, etc.) et la machine (le véhicule-robot intelligent) constitue un défi particulier qui demandera un effort de recherche et de développement sûrement considérable et encore impossible à estimer. Établir un « espace de manœuvre » multidimensionnel de mobilité résultant de scénarios mixtes, urbains et fort complexes qui intégreront une multiplicité de modes de transport ainsi que les comportements de conduite automatisés et humains dans une infrastructure routière qui varie, sera vraisemblablement un travail de longue haleine. A cet égard, il ne faudra guère s'attendre à un recul notable du nombre d'accidents, notamment dans la période de transition où le degré de mixité sera moindre et la technologie d'automatisation encore hétérogène et peu « mature ». On peut tout au plus supposer que de nouveaux types d'accidents dus à des défaillances techniques ou à des situations de circulation plus complexes et encore non maîtrisées se substitueront à certains types d'accidents évités et faciles à gérer.

A partir d'indicateurs individuels, on a examiné - et autant que faire se peut - quantifié avec pertinence - l'évolution du système de transport en termes de fonctionnalité. Les principaux résultats par indicateur et les tendances que l'on peut en déduire sur la fonctionnalité du système de transport figurent dans le tableau ci-dessous.

**tab. R-5 Effets de la conduite automatisée sur la fonctionnalité du système de transport**

Indicateur servant à l'évaluation de la fonctionnalité du système de transport	Évolution de l'indicateur suite à l'introduction des VA	
	Description des évolutions, chances, risques et principales connaissances relatifs à l'introduction des VA	Effet
Degré d'accessibilité en fonction de l'évolution des temps de trajet	Les temps de trajet sur des itinéraires individuels s'allongeront dans le scénario A où les VA seront plutôt utilisés à des fins privées. Par contre, ils raccourciront dans le scénario B où les VA seront majoritairement utilisés en mode partagé.	Scén. B Scén. A
Fiabilité des temps de trajet sur des itinéraires sélectionnés	Si l'on considère les différentes formes d'utilisation et la proportion des VA, on peut s'attendre à ce que les temps de trajet perdent en fiabilité dans le scénario A mais que celle-ci progresse dans le scénario B.	Scén. B Scén. A
Disponibilité des infrastructures de transport existantes	La disponibilité de base des infrastructures continuera d'être garantie à l'avenir mais n'exclura pas l'apparition de goulets d'étranglement ponctuels.	
Fluidité du trafic selon la densité de circulation	Une forte densité de circulation (véhicules peu espacés les uns des autres) due aux VA rendra plus compliquée la traversée de flots denses de TIM par les usagers de la mobilité douce (MD). De plus, la perception subjective du trafic est susceptible de se dégrader en raison de la forte densité de circulation, en particulier chez ses derniers.	
Zones de transfert entre les périmètres de conduite automatisée et ceux de la conduite traditionnelle	Régler la question de la restitution du contrôle du véhicule automatisé au conducteur n'est pas chose facile. La question de la fonctionnalité et de la sécurité du système de transport doit être résolue pour pouvoir utiliser les VA de niveau 4 de manière optimale.	
Réaffectation, optimisation et attribution temporaire des surfaces disponibles à la circulation	Le réaménagement de l'espace de circulation lié à l'arrivée des VA libérera un potentiel certes important, mais faiblement exploitable dans un contexte de trafic mixte. Une utilisation de l'espace de circulation dynamique et alternée dans la journée permettra de bien exploiter celui-ci au regard des nouvelles exigences que suppose la CA.	
Impact des VA sur la part des TP	La répartition modale existante sera impactée par les nouveaux types d'offres induits par l'automatisation. On risque de réduire involontairement la part des transports publics classiques (TP), selon la définition actuelle du terme, et d'assister à un recul de la part de la MD notamment dans le scénario A.	
Impact des VA sur l'infrastructure d'embarquement et de débarquement de passagers	Dans les rues des centres urbains, il faut s'attendre à une augmentation du nombre d'entrées et de sorties de passagers de VA partagés, particulièrement dans le scénario B, situation qui est propice à l'émergence de conflits entre les arrêts aux points relais de dépôt et de retrait de colis et les arrêts de TP dans ces zones.	
Impact sur la mobilité douce (MD)	La communication entre la MD non automatisée et les VA est presque impossible, ce qui peut mener à des situations critiques en matière de sécurité et causer des dysfonctionnements dans le système de transport. En outre, la MD et le TDM (transport de marchandises) auront parfois à "cohabiter" sur les mêmes aires de circulation, ce qui pourrait entraîner des conflits si la proportion de TDM automatisé venait à s'accroître.	

En prenant pour base trois routes pilotes de type différent (RGD dans la région d'Urdorf-Nord et deux routes du centre-ville de Zurich), on a en déduit quelles seront les exigences futures en matière de réglementation, d'exploitation et d'infrastructure. La problématique du trafic mixte, dont il est principalement question ici, devient évidente. Tant que celui-ci existera (par rapport aux véhicules traditionnels), le potentiel induit par les VA (par exemple, réduction de la largeur des voies de circulation) ne pourra être exploité que dans une très faible mesure. Concrètement, il est possible de faire correspondre les recommandations formulées sur les mesures à prendre au type de routes et d'acteur concerné (blocs thématiques haute priorité en vert), de la manière suivante:

**tab. R-6** Aperçu des recommandations sur les mesures à prendre selon le type de routes et les compétences

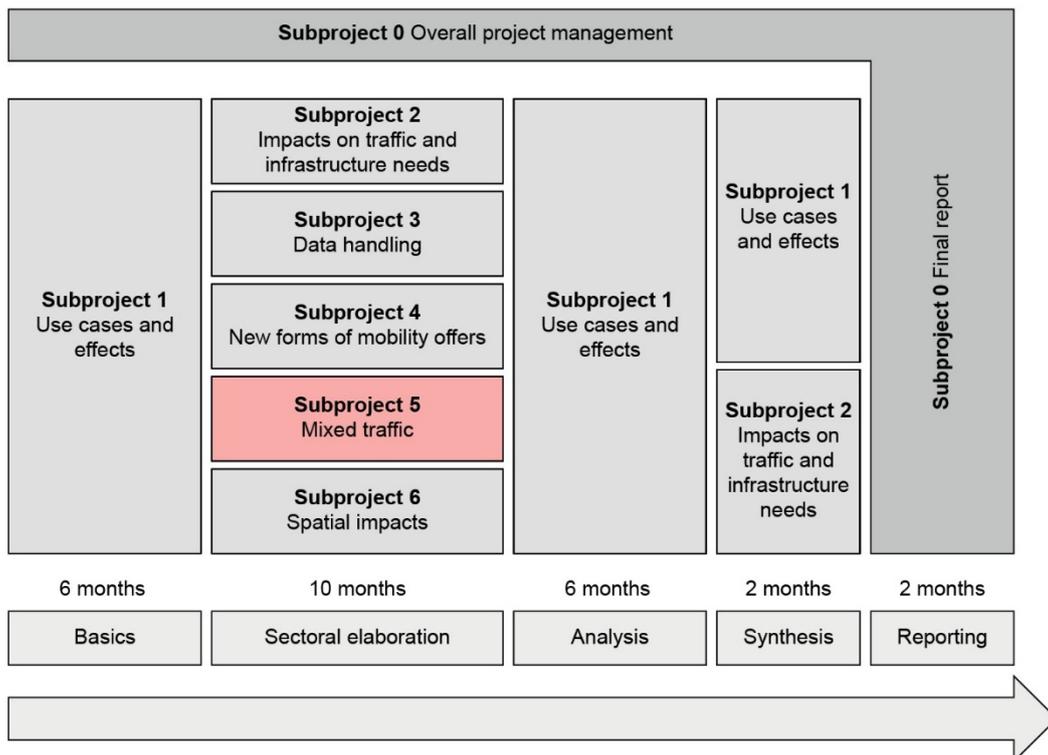
Bloc thématique	Description des différents aspects par bloc thématique	Type de route		Compétence/Responsabilité		
		RGD	RU	Confédération	Canton / ville	Tiers
Admission/ ouverture aux VA	Ouverture des routes à la circulation des VA			X		
	Immatriculation des VA			X		X
	Définition des modalités d'accès à la conduite de VA selon les groupes d'utilisateurs (par ex. aux enfants)			X		X
	Détermination du comportement des VA (Objectif: optimiser la fluidité du trafic)			X		X
	Définition de normes minimales et adaptation technique des véhicules (L1 à L3)			X		
	Obligation de procéder à une mise à jour régulière du ou des logiciel(s)			X		
	Élaboration de matériel cartographique HD			(X)	(X)	X
	Contrôle de l'aptitude des VA à exécuter la tâche de conduite de manière autonome et en toute sécurité			X		X
	Fermeture (partielle) des routes aux véhicules traditionnels dès qu'une certaine proportion de VA est atteinte	X	X	X	X	
Aires d'essai/ utilisation pilote	Aménagement de tronçons pilotes sur les RGD	X		X		
	Aménagement d'espaces pilotes sur le réseau urbain		X		X	
	Mise en place d'une ou de plusieurs aires d'essai reflétant des conditions d'exploitation propres à la Suisse (par ex. routes de haute montagne, postes de douanes, etc.)	X	X	X	X	
Modernisation (technique) tronçon/ nœuds	Modernisation de l'infrastructure en fonction des exigences futures (par ex. contrôle-commande, road-side unit, marquage, signalisation, télésurveillance, etc.)	X	X	X	X	
	Établissement d'une chronologie dans la mise en œuvre des adaptations nécessaires en matière d'infrastructure	X	X	X	X	
Périmètres de restitution du contrôle du VA au conducteur	Conception de points d'intersection	X	X	X	X	
	Définition de l'emplacement de points d'intersection entre RGD et RP	X		X	(X)	
	Définition de l'emplacement de points d'intersection sur le réseau urbain		X	X		
Affectation dynamique des surfaces	Étude de la mise en place de voies de circulation séparées pour les VA et mise en œuvre, si opportun	X		X		
	Déterminer la largeur future des voies de circulation	X	X	X	X	X
	Fixer le nombre, la géométrie et la répartition dans l'espace des emplacements de stationnement (ES)		X		X	
	Clarifier l'affectation de surfaces aux nouveaux types d'offres, en particulier aux véhicules non automatisés de la MD (Objectif : regrouper des modes de transport à comportement homogène)		X		X	
	Adapter ou compléter les normes en vigueur	X	X	X		X
Régulation du trafic (temporelle, spatiale, modale)	Fixer des limitations de vitesse aux VA	X	X	X		
	Gérer le réseau au moyen d'une tarification dynamique	X	X	X	X	
	Gérer le trafic de VA partagés et limiter les trajets à vide			X	X	X
	Intégrer les VA aux chaînes de transport intermodal				X	X
	Aménager des zones réservées aux services de mobilité				X	X
Zones d'arrêt aux points relais	Définir leur nombre et leur localisation		X		X	
	Réglementer les arrêts aux points relais pour maintenir un bon fonctionnement du système de transport		X		X	

Le présent rapport de recherche intitulé « Effets de la conduite automatisée, sous-projet 5: trafic mixte » s'inscrit dans le cadre du projet de recherche OFROU 2018/005. Il traite de la question fondamentale de la pénétration spatio-temporelle des VA dans le parc automobile et des effets de la conduite automatisée sur l'infrastructure, le développement territorial, la fonctionnalité du système de transport et la sécurité dans l'écoulement du trafic.

Au terme de ce projet, il apparaît toutefois que divers aspects liés aux thématiques de ce sous-projet demeurent toujours sans réponse et que les connaissances acquises soulèvent de nouvelles questions qui devront être traitées et élucidées au cours de programmes de recherche ultérieurs. Dans ce contexte, il est souhaitable qu'un processus de suivi continu et étroit soit mis en place - par exemple à l'Office fédéral des routes - sur la thématique de « l'introduction de la conduite automatisée ». L'objectif pourrait être d'assurer un suivi continu du progrès technique et des acquis de l'expérience et d'initier une réflexion permanente sur les résultats et les recommandations de cette étude. Il s'agit avant tout d'approfondir ou, le cas échéant, d'adapter les mesures et les recommandations qui s'y rapportent afin d'être le mieux préparé possible à l'arrivée de la conduite automatisée.

## Summary

Automated driving is a central topic for the future of transportation. Development is driven mainly by the automotive and IT industries, although the effects of automated vehicles (AV) on mobility and space also pose major challenges to the public sector. In light of this, the Swiss Federal Roads Office (FEDRO) has initiated a research package that deals with this topic in five subprojects (SP). The content of subprojects 2 to 6 (cf. *fig. S-1*) will be interlinked and the results will be used for SP 1, in which the synthesis will lead to the definition of use cases.



**fig. S-1** Overview of the research package and its subprojects (project tender FEDRO)

Subproject 5 examines the temporal and spatial diffusion of AVs (levels 4 and 5) as well as the influence of mixed traffic on the safety and functionality of the transport system. The aim of this subproject is to estimate the temporal/spatial penetration of AVs for the 10-year time steps between 2020 and 2050 and give recommendations to infrastructure providers based on the results.

The first part of the investigations of SP5 comprised a comprehensive literature review, which formed the basis for the assumptions and analyses in the further course of the project. The focus was on the market maturity of AVs and their penetration in the vehicle fleet, but it also dealt with current research in the areas of "functionality of the traffic system" and "safety in mixed traffic". The analysis of different sources showed very different estimations with regard to the penetration of AVs in the vehicle fleet. Especially for the year 2050, the results have a very wide range. This illustrates the considerable uncertainties in forecasting. Major reasons for this are that both the point in time at which AVs reach technical maturity for approval is unknown, as well as the willingness of people to buy AVs is difficult to predict. In a next step, an analysis of the driving forces for this development was carried out. The analysis of literature and assessments in the project allowed for a classification into primary and secondary drivers. Primary drivers have a relevant influence on the penetration of AVs in the vehicle fleet and its availability.

The "technical availability", "liability and insurance issues", the "form of use" as well as "investment costs" were identified as primary drivers. The main secondary drivers, which form the general conditions for the market diffusion of AVs, are "spatial regulation or approval", "road infrastructure equipment" and "road usability".

The analysis of driving forces serves as a foundation for the assumptions made in the fleet model regarding, for example, technology availability, spatial regulation and approval of AVs, which in turn have a central influence on the service life or ageing and thus the penetration speed of AVs in the Swiss vehicle fleet. On the basis of assumptions about the characteristics of different driving forces, migration scenarios were developed, which - assuming that the first automated vehicles (Level 4) will be available from 2025 - were modelled for the time steps (2030, 2040 and 2050) using a cohort model. With the help of this custom-developed fleet model, the proportions of the different forms of AVs in the Swiss vehicle fleet and their development over time were estimated and quantified using various scenarios. A trend scenario as well as a pro sharing scenario and corresponding extreme scenarios were developed.

In addition to the fleet model, the admission of AVs on the different road types is of central importance in order to evaluate the temporal and spatial penetration of automated vehicles. After identifying the relevant factors, the chronological sequence of the full usability of different road types by Level 4 AVs was predicted. It is expected that AVs will be admitted to freeways and comparable high-capacity roads (HCR) by 2030 (plus selected inner-city areas), to all urban roads by 2040 and to the remaining roads (main roads (MR) out of town) by 2050. This sequence of admission is based on research results from third parties as well as assessments in the project, taking into account the relevant influencing factors.

**tab. S-1** Overview on the prognosis of the full usability of different road types by AV Level 4

Road Type	Year	2020	2030	2040	2050
Freeways and high-capacity roads (HCR)		✘	✓	✓	✓
Extra-urban highways (rural roads) (MR)		✘	✘	✓*	✓
Urban arterials and streets (UA/US)		✘	✓*	✓	✓

- ✓ **Complete usability for AV Level 4 in all areas**
- ✓\* usability for AV level 4 spatially limited to selected connections or regions (e.g. city of Zurich for automated taxi fleets as pilot for 2030 or connections between freeways and urban roads used by AVs in 2040)
- ✘ AV-Level 4 is not possible on this road type (pilots are exceptions)

The knowledge gained, together with assumptions on which influence the degree of automation and the drive technology have on the PCE (Passenger Car Equivalent) of the vehicles, was transferred to SP2 in the further course of the research project. SP2 set up a traffic simulation in MATSim (Multi-Agent Transport Simulation Toolkit) for the complete road network of Switzerland (CH) in order to predict the effects of automated driving on future traffic patterns and traffic loads in the network.

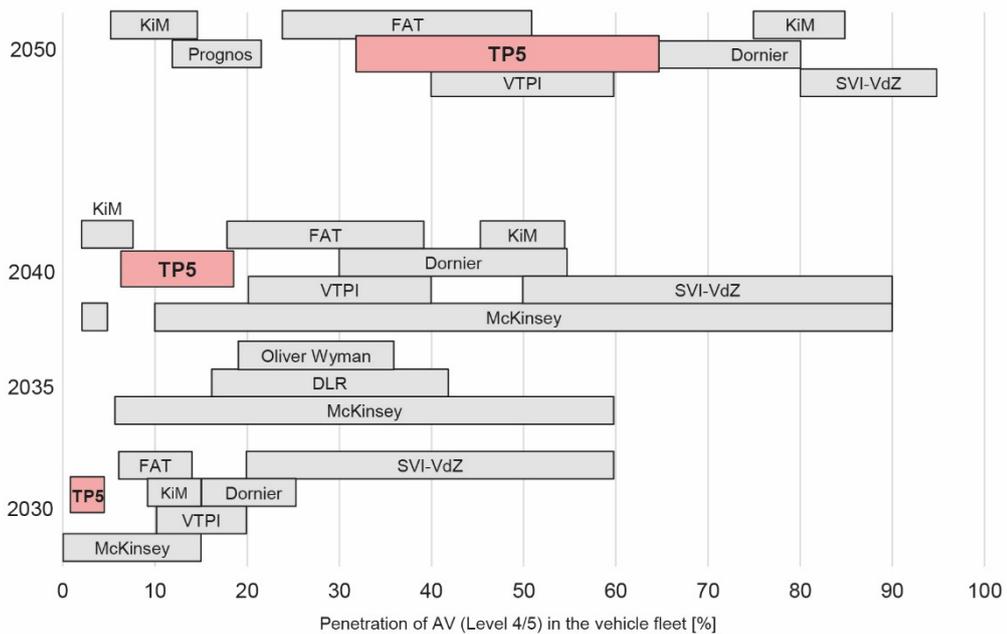
In addition to the gradual admission of AVs to different road types, the share of AVs (both privately owned and shared) plays an important role for the future development of transportation. Major differences can be seen between the two scenarios:

**tab. S-2** Computed values for the vehicle population of passenger cars in the Swiss fleet according to the assumptions in the fleet model per scenario until 2050

Year	2030	2040	2050
Trend Scenario (Scenario A)			
Total number of passenger cars	5'391'441	5'708'928	5'591'856
Total share of AVs	0.5 %	6.1 %	32.0 %
Extreme scenario Pro Sharing (Scenario B)			
Total number of passenger cars	5'416'004	5'199'751	2'867'391
Total share of AVs	2.0%	17.5%	62.2%

The share of AVs in the vehicle fleet in scenario B is approximately twice as large as in scenario A for all three intervals. This is due to the faster replacement of conventional vehicles when shared services are used more often. At the same time, it becomes clear that there is a high potential for reducing the number of vehicles on the Swiss road network through the “introduction of automated vehicles including corresponding services and regulatory measures”. Compared to today, the number of passenger cars could be roughly halved (Scenario B).

A comparison to other domestic and international studies shows that the values determined are rather low for the first years and in the mid-range in 2050.



**fig. S-2** Comparison of the results of different studies (grey) on the penetration of AVs with the fleet model developed in SP5 (red)

The analysis of the MATSim results shows that the share of AVs in the network is higher than the share of AVs in the fleet. This suggests a higher usage of AVs, which is also reflected in the higher mileage.

**tab. S-3 Comparison of the share of AVs in the network (MATSim) vs. in the vehicle fleet (fleet model)**

Comparison of the share of AVs in the network (MATSim) vs. in the vehicle fleet (fleet model)		2030	2040	2050
Scenario A (Switzerland entirely)	Share of AVs in vehicle fleet according to fleet model	0.5 %	5.6 %	31.0 %
	mean share of AVs in the network according to MATSim	0.6 %	6.9 %	37.9 %
Scenario B (Switzerland entirely)	Share of AVs in vehicle fleet according to fleet model	1.5 %	13.1 %	47.6 %
	mean share of AVs in the network according to MATSim	1.9 %	16.3 %	61.0 %

With regard to the effects on safety, the evaluations show that a major part (96 %) of today's road accidents (evaluations for the years 2010-2017) could be addressed by automating the driving task. The remaining 4 % are only partly or not addressable. Considering that AVs themselves can cause new types of accidents, the reduction of accidents by 96 % represents a maximum potential for the avoidance of accidents. The potential accident reductions were analyzed with regard to the road type, the time and the scenario as well:

**tab. S-4 Potential for the avoidance of accidents due to automated vehicles by year, road type and MATSim scenario under the assumptions described above**

Scenario	HCR 2030	HCR 2040	HCR 2050
Trend Scenario (Scenario A)	6 %	19 %	59 %
Extreme scenario Pro Sharing (Scenario B)	7 %	34 %	82 %
Scenario	MR 2030	MR 2040	MR 2050
Trend Scenario (Scenario A)	5 %	21 %	57 %
Extreme scenario Pro Sharing (Scenario B)	7 %	32 %	78 %
Scenario	UA 2030	UA 2040	UA 2050
Trend Scenario (Scenario A)	5 %	17 %	46 %
Extreme scenario Pro Sharing (Scenario B)	6 %	25 %	63 %

A major drawback of the analysis is that the assumptions on the complex system technology (sensor technology, data processing, actuator technology) are greatly simplified at this moment, especially with regard to the susceptibility to errors and performance of the level 4 (level 5) vehicles. The interaction between humans (as drivers, pedestrians, etc.) and machines (the intelligent robotic vehicle) is emerging as a particular challenge, with research and development costs that cannot yet be estimated, but are certainly very high. The multi-dimensional "action space" of mobility, which arises in future urban, highly complex mixed traffic scenarios with multiple different modes of transport, automated and human behavior in changing infrastructures, requires long-term consideration and permanent action. In this respect, particular in the transition periods with lower degrees of penetration and still "younger", heterogeneous automation technology, a noticeable decrease in the number of accidents can hardly be assumed, at most a "replacement" of some avoided easily manageable accident types by new types due to faulty technology or not yet controllable more complex traffic situations.

Several indicators were used to analyze how the functioning of the transport system can be guaranteed. Where possible and meaningful, indicators were quantified. The following table depicts the main findings for each indicator and derives the tendency of the effects on the functionality of the transport system that result from it.

**tab. S-5 Influence of AVs on the functionality of the transport system**

Indicators for the evaluation of the functionality of the transport system	Development of indicators due to the introduction of AVs	
	Description of the development, opportunities and risks, and central findings with regard to the introduction of AVs	Effect
Quality of accessibility in terms of travel time changes	The travel times on selected routes will increase in scenario A (more privately used AVs) and decrease in scenario B (more shared vehicles).	
Reliability with respect to travel times on selected routes	Due to the different forms of usage and shares of AVs, the reliability of travel times is expected to decrease in scenario A and increase in scenario B.	
Availability of the existing transport infrastructure	The availability of infrastructure will still be guaranteed in future, but occasional bottlenecks are still possible.	
Quality of traffic flow with regard to traffic density	High traffic density (lower car following distances) due to AVs in high traffic flows impede crossing for slow traffic. The subjective perception of traffic might be deteriorated due to high traffic densities, especially for active modes.	
Transfer between areas with automated and conventional driving	In order to make optimal use of automated driving level 4, the process of handing over the driving task from the system to the human needs regulation. This is a challenge considering the functionality and safety of the transport system.	
Reassignment, optimization and temporary allocation of the existing transport infrastructure	The modification of road space offers great potential. Mixed traffic, though, does not allow for the use of the full potential. Dynamically and temporally changing the usage offers the possibility to make better use of the road space considering the requirements of AVs.	
Impact of AVs on the share of public transport	The new forms of automated mobility will influence the modal split. There is a risk of an unintended reduction in the share of conventional public transport (PT as it is defined today) and active mobility, especially in scenario A.	
Impact of AVs on the infrastructure for transfers and stops	Due to the shared AVs, the number boarding and alighting processes on urban roads is expected to increase (especially in scenario B). This may lead to conflicts at PUDO-zones and PT stops.	
Impact on active mobility	The communication between non-automated road users (especially pedestrians and bicyclists) and AVs is almost not feasible. This can lead to critical situations considering traffic safety and may result in a transport system not working optimally. Additionally, road users using active modes possibly need to share road space with automated freight transport. As automated freight transport increases this may lead to conflicts.	

Based on this analysis, future regulatory, operational and infrastructural requirements were derived for three pilot studies, a freeway in the region of Urdorf-Nord and two urban roads in Zurich. Especially mixed traffic, which is the focus of this SP, was found to be a major issue. As long as there are conventionally driven vehicles, the potential of AVs (e.g. reduction in lane width) cannot be fully exploited. A more precise allocation of the recommendations to the road types can be found in the following table (topics with high potential are highlighted in green).

**tab. S-6 Overview of recommendations by road type and responsibility**

Topic	Description of the different aspects of the topic	Road Type		Responsibility / Lead		
		Freeways	Urban roads	Federal Government	Canton/ City	Others
Approval of AVs	Admission of AVs on roads			X		
	Licensing of AVs			X		X
	Definition of admitted user groups (e.g. children)			X		X
	Definition of behaviors of AVs (Goal: Optimization of traffic flow)			X		X
	Definition of minimum standards and upgrading of vehicles (L1 through L3)			X		
	Obligations for periodic software updates			X		
	Generation of HD-maps			(X)	(X)	X
	Ensurance of driving control			X		X
	(Partial) closure of roads to conventional vehicles when a certain penetration rate of AVs is reached	X	X	X	X	
Test beds/ Pilot use cases	Establishment of pilots on freeways	X		X		
	Establishment of pilots in the urban network		X		X	
	Establishment of test beds for Switzerland-specific conditions (e.g. alpine roads, toll plazas, etc.)	X	X	X	X	
(Technical) Upgrade of streets/ Nodes	Equipment of infrastructure considering future requirements (e.g. control technology, Road-Side Units, road markings, remote control etc.)	X	X	X	X	
	Definition of the temporal sequence for the required infrastructure adaptations	X	X	X	X	
AV hand over points	Elaboration of the design of interfaces	X	X	X	X	
	Definition of positioning for HCR-MR handover areas	X		X	(X)	
	Definition of positioning of handover areas in the urban network		X	X		
Dynamic allocation of space	Investigations on separate lanes for AVs and their establishment	X		X		
	Definition of future lane widths	X	X	X	X	X
	Definition of the number, geometry and spatial distribution of parking lots		X		X	
	Decision on space allocation for new forms of mobility (especially for slow moving non-automated vehicles) (Goal: bundle forms of mobility with homogeneous behaviors)		X		X	
	Adaptation and supplementation of current norms and regulations	X	X	X		X
Traffic control (temporal, spatial, modal)	Definition of speed limits for AVs	X	X	X		
	Traffic control through dynamic pricing	X	X	X	X	
	Management of shared AVs and limitation of empty drives			X	X	X
	Integration of AVs into intermodal trips				X	X
	Establishment of dedicated areas for mobility services				X	X
PUDO-Zones	Definition of locations and amount		X		X	
	Regulation of the stopping processes in order to remain the functionality of the transport system		X		X	

This report on “Effects of Automated Driving: Subproject 5: Mixed Traffic” as part of the research package ASTRA 2018/005 deals with the (temporal/spatial) diffusion of automated vehicles in the vehicle fleet as well as their effects on the infrastructure, the spatial development, the functionality of the transport system and traffic safety.

After completion of the project, some aspects remain open and some new questions arise from the knowledge gained in this project, which need to be answered in future research. In this regard, a particular recommendation is to establish a continuous monitoring process on the “implementation of AVs” (e.g. by FEDRO). The objective of this is to monitor the technical progress as well as practical experience continuously and reflect on the recommendations and findings from this project. Doing so, the recommendations and measures can be adapted or elaborated in detail, which leads to an optimal preparation for the implementation of automated driving.



# 1 ASTRA-Forschungspaket Auswirkungen des automatisierten Fahrens

## 1.1 Ausgangslage

Das Initialprojekt «Automatisiertes Fahren: Klärung des Forschungs- und Handlungsbedarfs» (ASTRA 2015/004) hat die im Bericht des Bundesrates «Automatisiertes Fahren – Folgen und verkehrspolitische Auswirkungen» vom Dezember 2016 gestellten Fragen aufgenommen, sie vertieft und den daraus folgenden Forschungsbedarf benannt. Diese aus schweizerischer Sicht wesentlichen Wissenslücken sollen z.T. mit dem vom ASTRA geführten Forschungspaket «Auswirkungen des automatisierten Fahrens» geschlossen werden.

## 1.2 Ziel und Zweck des Forschungspakets

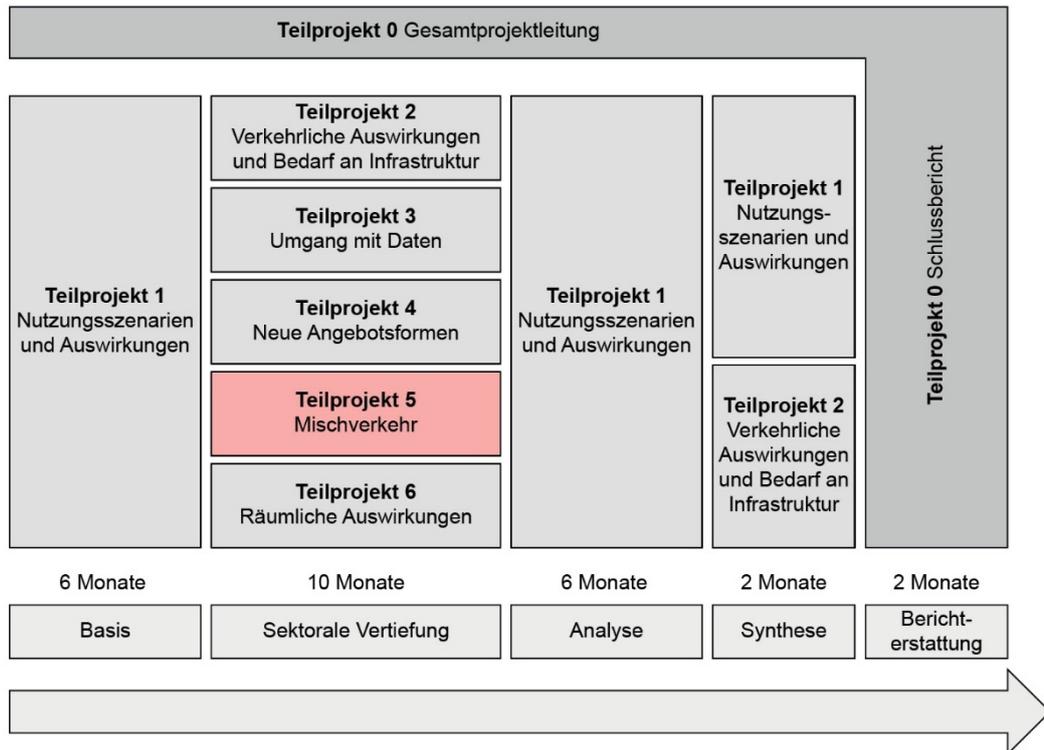
Paketziel ist es, Aspekte des automatisierten Fahrens zu klären, die kurz- und mittelfristig wesentlichen Einfluss auf die Anforderungen an Strassen und strassenseitige Infrastruktur haben können. Verschiedene Aspekte wie z.B. die verkehrlichen Auswirkungen, den Umgang mit Daten, die Organisation des Mischverkehrs, den Einfluss neuer Mobilitätsangebote oder die Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf die Raumstruktur werden dazu geklärt. Für Politik, Behörden und relevante Stakeholder werden so Grundlagen geschaffen, um sich auf die absehbare Entwicklung in der Schweiz vorzubereiten und diese bei Bedarf auch proaktiv beeinflussen zu können.

Das Forschungspaket ist so strukturiert, dass durch das Zusammenspiel verschiedener miteinander in Beziehung stehender Forschungsarbeiten ein zusätzlicher Mehrwert generiert wird. In der Synthese der einzelnen Forschungsvorhaben ergibt sich, bezogen auf die Schweiz, eine differenzierte Betrachtung von Chancen und Risiken automatisierter Fahrzeuge für die Gesellschaft und spezielle Gruppen, sowie Handlungsoptionen für die Politik und Behörden.

## 1.3 Struktur des Forschungspakets

### 1.3.1 Teilprojekte

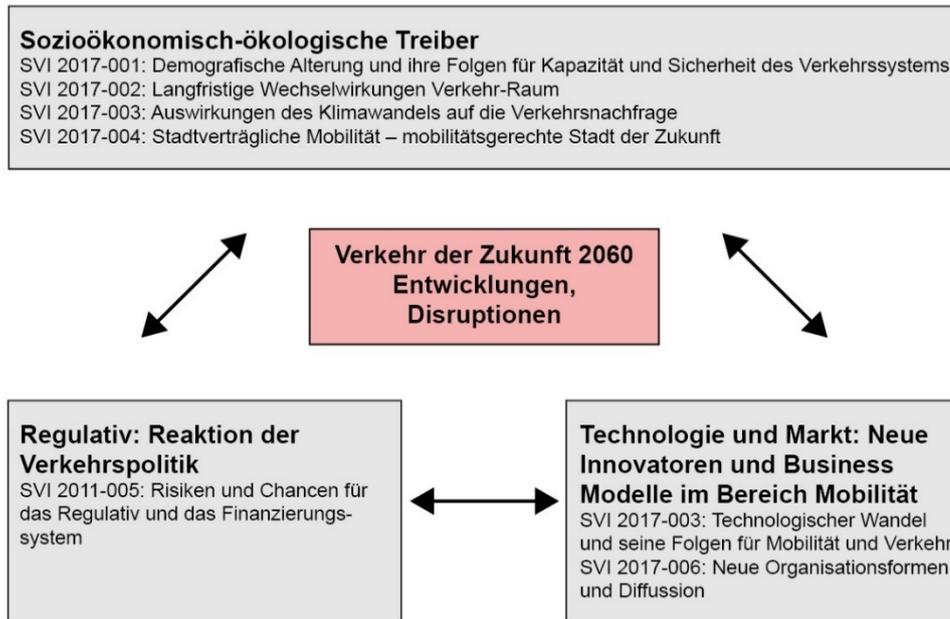
Das Forschungspaket umfasst insgesamt sechs Teilprojekte, welche zu einzelnen thematischen Schwerpunkten Forschungsergebnisse erarbeiten. Dabei ist das TP1 als Basis den sektoralen Vertiefungen vor- und nachgelagert. Zudem kommt das TP2 mit einem im Nachgang zu den sektoralen Vertiefungen nachgelagerten, zu definierenden Zielszenario nochmals zum Einsatz.



**Abb. 1** Übersicht Forschungspaket mit seinen Teilprojekten (Ausschreibung ASTRA)

### 1.3.2 Abgrenzung zu Verkehr der Zukunft 2060

Ziel des Gesamtprojektes «Verkehr der Zukunft 2060» ist gemäss SVI 2017/003 «eine visionäre Sicht auf die langfristige Entwicklung des Verkehrs» zu erarbeiten. Während das Teilprojekt SVI 2017/003 (Technologischer Wandel und seine Folgen für Mobilität und Verkehr) den inhaltlichen Fokus auf den technologischen Aspekt legt, umfasst das gesamte Paket eine Reihe weiterer relevanter Treiber, welche in separaten Teilprojekten bearbeitet werden.



**Abb. 2** Übersicht der Teilprojekte zu Verkehr der Zukunft (SVI 2017/003)

Das Teilpaket «Technologischer Wandel» und seine Folgen für Mobilität und Verkehr untersucht die erwarteten technologischen Fortschritte für die gesamte Spannweite des Verkehrssystems. Dabei werden folgende Forschungsfragen im Rahmen der Studie adressiert:

- Welches sind die relevanten technologischen Entwicklungen bis zum Jahr 2060?
- Welche Trends treiben diese Entwicklungen an?
- Welche Auswirkungen haben die verschiedenen Technologien auf Verkehrsangebot und -nachfrage im Personen- und Güterverkehr?
- Welches sind die Implikationen auf das Gesamtverkehrssystem (Ableitung der Schlüsseltechnologien-Sets zu drei langfristigen Entwicklungsszenarien)?

Dabei werden alle Verkehrsträger (also auch die Schiff- und Luftfahrt) sowie die relevanten Schlüsseltechnologien miteinbezogen. Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick zu den relevanten Unterschieden zum vorliegenden Forschungsschwerpunkt des TP5:

**Tab. 1** Vergleich der Rahmenbedingungen der Projekte *Verkehr der Zukunft* (EBP Schweiz AG und Rapp Trans AG, 2018) und des vorliegenden TP5

	<b>Verkehr der Zukunft</b>	<b>TP5 (Mischverkehr)</b>
<b>Zeitlich</b>	2060	2050
<b>Verkehrsarten</b>	Strassenfahrzeuge Schienenverkehr Wasserfahrzeuge Luftverkehr	Alle Verkehrsteilnehmer des strassengebundenen Verkehrs
<b>Räumlich</b>	Betrachtung für die Schweiz	Betrachtung für die Schweiz
<b>Inhaltlich</b>	Fokus auf Technologien innerhalb und ausserhalb des Verkehrssektors, welche eine Wirkung auf das Mobilitätsangebot haben könnten, wenn sie umgesetzt würden.	Zeitlich-räumliche Durchdringung des automatisierten Strassenverkehrs (Personen- und Güterverkehr) und die Auswirkungen des Mischverkehrs auf die Sicherheit und Funktionsfähigkeit des (Strassen-) Verkehrssystems.

## 2 Fragestellung und Ziele des Teilprojekts 5

### 2.1 Fragestellung TP5

Im Hinblick auf die mittel- und langfristige Planung und Entwicklung des Verkehrsnetzes und die Raumentwicklung nimmt das Thema automatisiertes Fahren zunehmend eine Schlüsselrolle ein. Sowohl in- als auch ausländische Studien zeigen, dass sowohl im Bereich des Mobilitätsverhaltens (Nachfrage, Fahrzeugwahl etc.) als auch in Bezug auf den Verkehrsablauf (Verkehrstechnik, Kapazität der Infrastruktur, Verkehrssicherheit etc.) starke Veränderungen aufgrund eines steigenden Anteils automatisierter Fahrzeuge im Verkehrssystem erwartet werden.

Auch für die Schweiz stellt sich die Frage, welche Effekte (teil-) automatisiertes Fahren auf die Infrastruktur und die Raumentwicklung haben wird. Dabei muss eine solche Entwicklung zwingend über verschiedene zeitliche Zustände betrachtet werden, da einerseits die Automatisierung in mehr oder weniger schnellen Schritten verlaufen kann, andererseits die Anpassung und Erweiterung der Infrastruktur aufgrund der neuen Fahrzeugtechnologie und der damit verbundenen Nutzeranforderungen mit hohen Investitionen verbunden ist und nachhaltig sein soll. Eine Betrachtung zeitlicher Zwischenstände ist von grosser Bedeutung, um die Frage der «richtigen» bzw. aufwärtskompatiblen Investitionen in die Infrastruktur entsprechend zu beantworten. Nicht zuletzt geht es auch darum, in der Verkehrs- und Raumordnungspolitik die richtigen Weichen zu stellen, sodass die Diffusion und Durchdringung des automatisierten Fahrens zielgerichtet stattfinden kann. Es ist also angezeigt, dass zentrale Aspekte der Thematik automatisiertes Fahren genauer untersucht werden.

In dem 2017 abgeschlossenen Forschungsprojekt (ASTRA 2015/004; (Rapp Trans AG, 2017)) wurden – im Sinne eines Initialprojekts – der Forschungs- und Handlungsbedarf im Bereich des automatisierten Fahrens eruiert, priorisiert und konkrete Forschungsprojekte formuliert. Darin wird deutlich, dass es Themenfelder gibt, in welchen die Schweiz die Entwicklung nicht selbst beeinflussen, sondern nur beobachten und zu einem gegebenen Zeitpunkt übernehmen kann oder letzten Endes übernehmen muss. Dies sind bspw. die eigentliche Fahrzeugtechnologie bzw. die durch die Automobil- und IT-Industrie forcierte Entwicklung in Bezug auf den Betrieb der Fahrzeuge. Die Behörden der Schweiz können hier bestenfalls im Bereich der Fahrzeugzulassung und Regulierung der Betriebserlaubnis Einfluss nehmen. Dagegen gibt es aber andere Themenfelder, innerhalb der das automatisierte Fahren aktiv beeinflusst werden oder die zeitlich-räumliche Durchdringung dieser Technologie beeinflusst werden kann. Das oben erwähnte Forschungsprojekt empfiehlt deshalb für die letztgenannten und beeinflussbaren Themenfelder insgesamt sechs Forschungsprojekte (Teilprojekte), welche zeitlich parallel und in einem iterativen Prozess bearbeitet werden sollen, wobei jedes Teilprojekt einen eigenen Schwerpunkt besitzt (siehe Abb. 1).

### 2.2 Ziel des TP5

Im hier behandelten TP5 (Mischverkehr) steht die Frage des Einflusses des Nebeneinanders verschiedener Fahrzeugtypen mit einem unterschiedlichen Automatisierungsgrad sowie deren Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern im Zentrum. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Untersuchung der Sicherheit und der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems.

Die Herausforderungen des TP5 sind die Einschätzungen bzw. Prognose des Durchdringungsgrades der automatisierten Fahrzeuge auf der zeitlichen, der räumlichen und auch auf der technischen Ebene. Letztlich geht es um die Kernfrage: *«Wann werden wo und in welchem Ausmass automatisierte Fahrzeuge auf dem Schweizer Strassennetz verkehren und was haben diese und deren Vermischung mit anderen Verkehrsteilnehmern für Auswirkungen bezüglich der Sicherheit und der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems?»*.

Diese Einschätzung ist mit den parallel laufenden Teilprojekten abzugleichen und die getroffenen Annahmen und Zwischenergebnisse sind mit diesen in einem iterativen Prozess zu würdigen und fachlich zu verorten. Grundsätzlich kann im Rahmen des Forschungsprojekts auf ausländische Studien (insbesondere neuere Arbeiten aus Deutschland) zurückgegriffen werden und entsprechende Analogieüberlegungen hergeleitet werden. Die dort gewonnenen Erkenntnisse sind aber im Lichte der schweizerischen Bedingungen kritisch zu hinterfragen und durch die Erkenntnisse des vorliegenden Forschungsprojekts zu erweitern. Basierend auf diesen Erkenntnissen müssen die Auswirkungen und Herausforderungen, auch unter Berücksichtigung typischer Verkehrssituationen bezüglich automatisierten Fahrens, abgeschätzt werden. Dies ermöglicht es, Massnahmen und Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Auswirkungen des Mischverkehrs von automatisierten Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern in Bezug auf die Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems abzuleiten.

## 2.3 Methodisches Vorgehen

Die im Rahmen des TP5 vorgesehenen Arbeiten beruhen auf einer ausführlichen Literaturrecherche, wobei nationale und internationale Literatur im Hinblick auf themenverwandte Projekte gesichtet und analysiert wird (vgl. Kapitel 3.1). Einen Schwerpunkt der Literaturrecherche bildet das Themenfeld Durchdringung und Marktreife des automatisierten Fahrens (vgl. Kapitel 3.2), da die in diesem Zusammenhang gewonnenen Erkenntnisse die Grundlage für die Treiberanalyse (vgl. Kapitel 3.3) zur Vertiefung des Themenschwerpunkts bilden. Im Rahmen der Treiberanalyse werden zudem interne Workshops abgehalten, welche dazu dienen, die relevanten nationalen Einflussfaktoren zu identifizieren. Darüber hinaus wird die vorhandene Literatur in Bezug auf die Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems von automatisierten Fahrzeugen (AF) im Mischverkehr als Grundlage für die anschliessenden Analysen gesichtet (vgl. Kapitel 3.4).

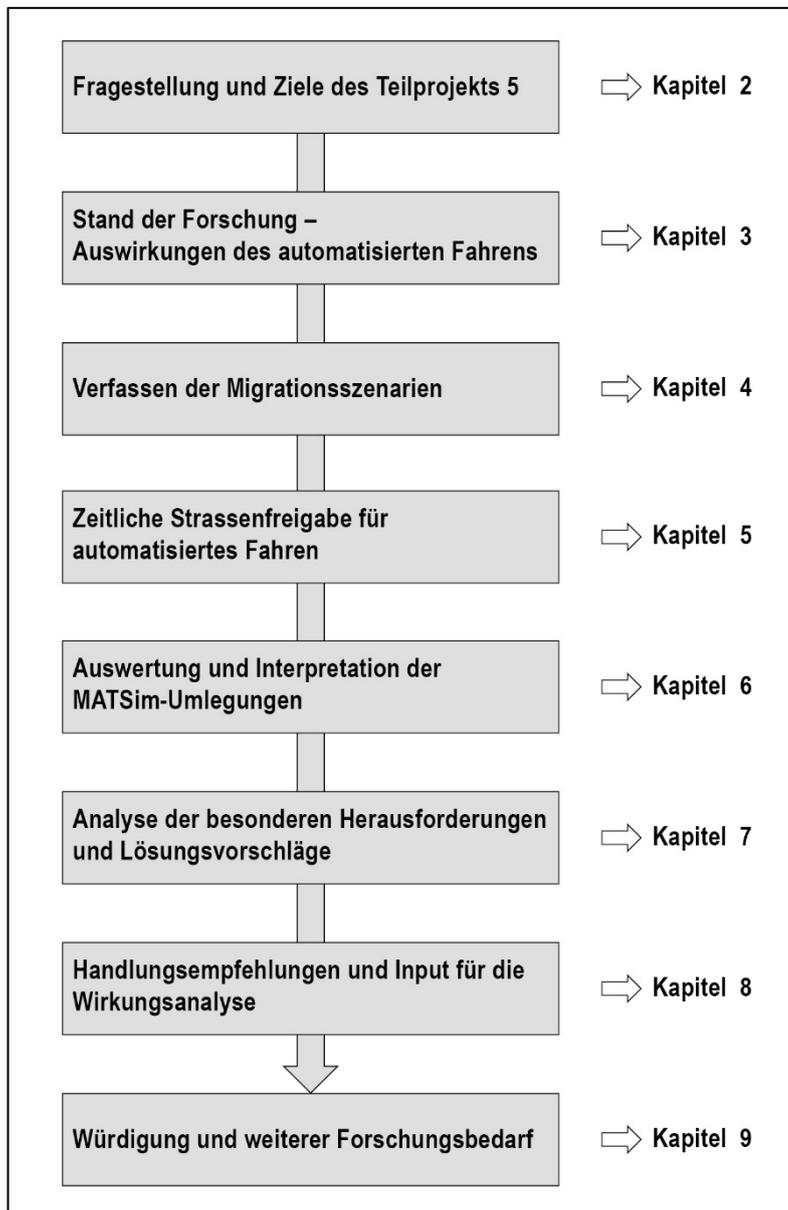
Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen und in Abstimmung mit den anderen TP sowie der Gesamtprojektleitung wird ein Flottenmodell aufgebaut, welches die Entwicklung und Zusammensetzung der Schweizer Fahrzeugflotte bis in das Jahr 2050 prognostiziert (vgl. Kapitel 4.3). Dabei werden verschiedene Szenarien gebildet, die die unterschiedlichen Nutzungsformen (privat/Sharing) von AF sowie eine unterschiedlich schnelle Durchdringung dieser berücksichtigen (vgl. Kapitel 4.4). Ergänzt wird das Flottenmodell durch ein Modul, welches auch die Entwicklung des Güterverkehrs (GV) in zwei Szenarien prognostiziert (vgl. Kapitel 4.5). Die entwickelten Szenarien werden mithilfe von Sensitivitäten auf ihre Stabilität geprüft und mit den bereits vorhandenen Studien zu diesem Thema verglichen (vgl. Kapitel 4.6 und 4.6.1).

Ergänzend zur Entwicklung der Fahrzeugflotte spielt auch die zeitliche Strassenfreigabe für AF eine wichtige Rolle im Zusammenhang mit dem Mischverkehr von AF und nicht automatisierten Verkehrsteilnehmern. Deshalb werden die verschiedenen Strassentypen hinsichtlich ihrer Eignung für die Einführung von AF geprüft und eine gestaffelte Freigabereihenfolge der unterschiedlichen Strassentypen festgelegt (vgl. Kapitel 5.1 und 5.2).

Das Flottenmodell, die definierte Reihenfolge der Strassenfreigabe und ein zusätzlich entwickeltes Modell, welches ermittelt, wie viele Personenwagen-Einheiten (PWE, engl. Passenger Car Units, PCU) die verschiedenen Verkehrsmittel in Bezug auf deren jeweiligen zeitlich-räumlichen Platzbedarf auf der Strasse ausmachen (vgl. Kapitel 5.3), bilden die Teilergebnisse des TP5 für die durch das TP2 durchgeführten MATSim-Simulationen. Die von TP2 berechneten MATSim-Ergebnisse werden durch TP5 mit Fokus auf die raum- und strassendifferenzierte AF-Durchdringung ausgewertet und aufbereitet (vgl. Kapitel 6).

Aufbauend auf den MATSim-Ergebnissen und durch weitere Datengrundlagen ergänzt, werden die Effekte der AF im Mischverkehr auf die Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems analysiert und anhand ausgewählter Pilotstrecken beispielhafte Massnahmenfelder zur Gewährleistung beider Themen erarbeitet (vgl. Kapitel 7). Abschliessend werden Handlungsempfehlungen zu Händen der Infrastrukturbetreiber und entsprechende Grundlagen für die Wirkungsanalyse erarbeitet (vgl. Kapitel 8).

Zum Abschluss des TP5 werden ergänzend zu den im vorliegenden Forschungsprojekt bearbeiteten Themen weitere Themenfelder bzw. Forschungsfragen zusammengestellt (vgl. Kapitel 9). Das oben beschriebene Vorgehen ist in der folgenden *Abb. 3* grafisch aufbereitet und zusammengefasst.



**Abb. 3** Übersicht Berichts Aufbau und Workflow TP5

### 2.3.1 Definition der Automatisierungsgrade und Abgrenzung in TP5

Wird von Automatisierung von Strassenfahrzeugen gesprochen, so muss zunächst definiert werden, was darunter genau zu verstehen ist. Laut einiger Institutionen werden verschiedene Stufen der Automatisierung unterschieden. Die einzelnen Stufen beschreiben, welchen Teil der Fahraufgabe der menschliche Fahrer übernimmt und welche Aufgaben dem automatisierten System überlassen werden. Die am häufigsten verwendete Einteilung der Stufen der Automatisierung stammt von der Society of Automotive Engineers (SAE) (SAE International, 2018), wobei fünf Stufen unterschieden werden (vgl. *Abb. 4*). Während in den Stufen 0 bis 2 das System zwar Aufgaben übernehmen kann, muss der Fahrer die Fahrumgebung jedoch stets überwachen, um im Bedarfsfall eingreifen können. Ab Stufe 3 geschieht diese Überwachung komplett durch das automatisierte System, bei Stufe 3 muss der Fahrer jedoch jederzeit als Rückfallebene zur Verfügung stehen, beispielsweise wenn das System ausfällt. Die Stufen 4 und 5 entsprechen einer noch höheren Automatisierung,

bei der der Fahrer nicht mehr als Rückfallebene zur Verfügung stehen muss. Dies gilt bei Stufe 4 nur für den bestimmten Anwendungsfall, bei Stufe 5 in allen Situationen. Erst ab Stufe 4 ist es also möglich, dass sich der Fahrer komplett anderen Aufgaben zuwendet oder gar keine Fahrerlaubnis besitzt, da die Verantwortung beim System liegt. In Stufe 4 gilt dies jeweils nur für den zuvor definierten Anwendungsfall, also beispielsweise nur auf der Autobahn, in Stufe 5 überall.

Das TP5 beschäftigt sich mit dem Automatisierungsgrad der Stufen 4 (im jeweiligen Anwendungsfall) und 5. Da der menschliche Fahrer in den unteren Stufen der Automatisierung noch immer das System übersteuern kann, ist dies noch eher ein menschliches Fahren. Insbesondere, wenn der Mensch die Fahrumgebung noch dauerhaft überwachen muss, werden sich in Bezug auf die Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems noch ähnliche Zustände ergeben wie beim konventionellen Fahren. Das TP5 beschränkt sich daher beim Betrachten von automatisierten Fahrzeugen auf die Automatisierungsgrade 4 und 5. Befindet sich ein Fahrzeug, welches der Automatisierungsstufe 4 entspricht, nicht im Anwendungsfall, in dem es automatisiert fahren kann, wird es als konventionelles Fahrzeug betrachtet.

Die nachfolgende *Abb. 4* gibt einen Überblick der Einteilung der Automatisierungsgrade laut SAE inklusive ihrer Definitionen. Es wird jeweils darauf eingegangen, welche Aufgaben der Fahrer und welche das System übernehmen muss. Des Weiteren wird darauf verwiesen, welche Bezeichnung in anderen Standards für die gleiche Stufe verwendet werden. So ist beispielsweise die in Deutschland gängige Einteilung der *Bundesanstalt für Straßenwesen* (BASt) entsprechend zugeordnet.

SAE level	SAE name	SAE narrative definition	Execution of steering and acceleration/ deceleration	Monitoring of driving environment	Fallback performance of dynamic driving task	System capability (driving modes)	BASt level	NHTSA level
<b>Human driver monitors the driving environment</b>								
0	No Automation	the full-time performance by the <i>human driver</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even when enhanced by warning or intervention systems	Human driver	Human driver	Human driver	n/a	Driver only	0
1	Driver Assistance	the <i>driving mode</i> -specific execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	Human driver and system	Human driver	Human driver	Some driving modes	Assisted	1
2	Partial Automation	the <i>driving mode</i> -specific execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	System	Human driver	Human driver	Some driving modes	Partially automated	2
<b>Automated driving system ("system") monitors the driving environment</b>								
3	Conditional Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> with the expectation that the <i>human driver</i> will respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	Human driver	Some driving modes	Highly automated	3
4	High Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even if a <i>human driver</i> does not respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	System	Some driving modes	Fully automated	3/4
5	Full Automation	the full-time performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> under all roadway and environmental conditions that can be managed by a <i>human driver</i>	System	System	System	All driving modes		

**Abb. 4** Einteilung und Definition der Automatisierungsgrade (SAE International, 2018)

### 2.3.2 Zusammenhänge der Szenarien und Modelle im Rahmen des Gesamtprojekts

Im Rahmen der Ausschreibung des Forschungsprojekts und auch bei der Bearbeitung durch die unterschiedlichen TP werden verschiedene Begrifflichkeiten für unterschiedliche zukünftige Zustände verwendet. Im Folgenden werden deshalb die unterschiedlichen Zustände und die damit verbundenen Szenarien gegeneinander abgegrenzt. Dies dient auch für die an die Bearbeitung der Teilprojekte anschließenden Synthesearbeiten als Grundlage und Orientierung, um Unklarheiten zu vermeiden. Entgegen der Ausschreibung des TP5 (ASTRA 2018/005) wird im Folgenden bewusst auf den ersten Zehn-Jahresschritt 2020 verzichtet. Dies in Anbetracht der Tatsache, dass dieser quasi dem heutigen Zustand entspricht und absehbar ist, dass 2020 keine Fahrzeuge mit Automatisierungsgrad 4 oder 5 zugelassen sein werden.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wird zwischen den folgenden Szenariotypen unterschieden:

- Nutzungsszenarien: Vorstellbare Szenarien bezüglich der Nutzung der automatisierten Fahrzeuge zu unterschiedlichen Zeitpunkten (2030, 2040, 2050).
- Eckszenarien: Sind zwei Extremausprägungen der Nutzungsszenarien für das Jahr 2050
- Migrationsszenarien: Durchdringung der automatisierten Fahrzeuge in der Fahrzeugflotte zu unterschiedlichen Zeitpunkten (2030, 2040, 2050) jeweils in Abhängigkeit der Nutzungsszenarien.

Die beiden Eckszenarien (Extremszenario Trend und Extremszenario Pro Sharing) im Jahr 2050 stellen die «Leitplanken» minimaler und maximaler Ausprägungen hinsichtlich der Durchdringung der automatisierten Fahrzeuge in der Flotte und im Netz dar. Diese beiden Extremszenarien bilden zusammen mit der heutigen Situation ein die anderen Szenarien umhüllendes Dreieck (blau). Innerhalb dieser Grenzen befinden sich verschiedene Nutzungsszenarien für vier mögliche Entwicklungspfade (zwei führen zu den beiden Eckszenarien sowie eines zum Trendszenario und eines zum Pro Sharing-Szenario) und jeweils drei Zeitzustände (2030, 2040, 2050). Alle Nutzungsszenarien werden im Rahmen des TP2 mithilfe von MATSim simuliert. Jedes Nutzungsszenario basiert auf einem eigenen Migrationsszenario, welches die Fahrzeugflottenzusammensetzung in diesem definiert (Herleitung mithilfe des Flottenmodells des TP5; vgl. Kapitel 4.3). Die drei beschriebenen Zeitzustände werden zudem durch eine unterschiedliche Freigabe an Strassentypen für AF charakterisiert (vgl. dazu auch Kapitel 5). In der folgenden Abbildung sind Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Szenariotypen grafisch zusammengefasst.

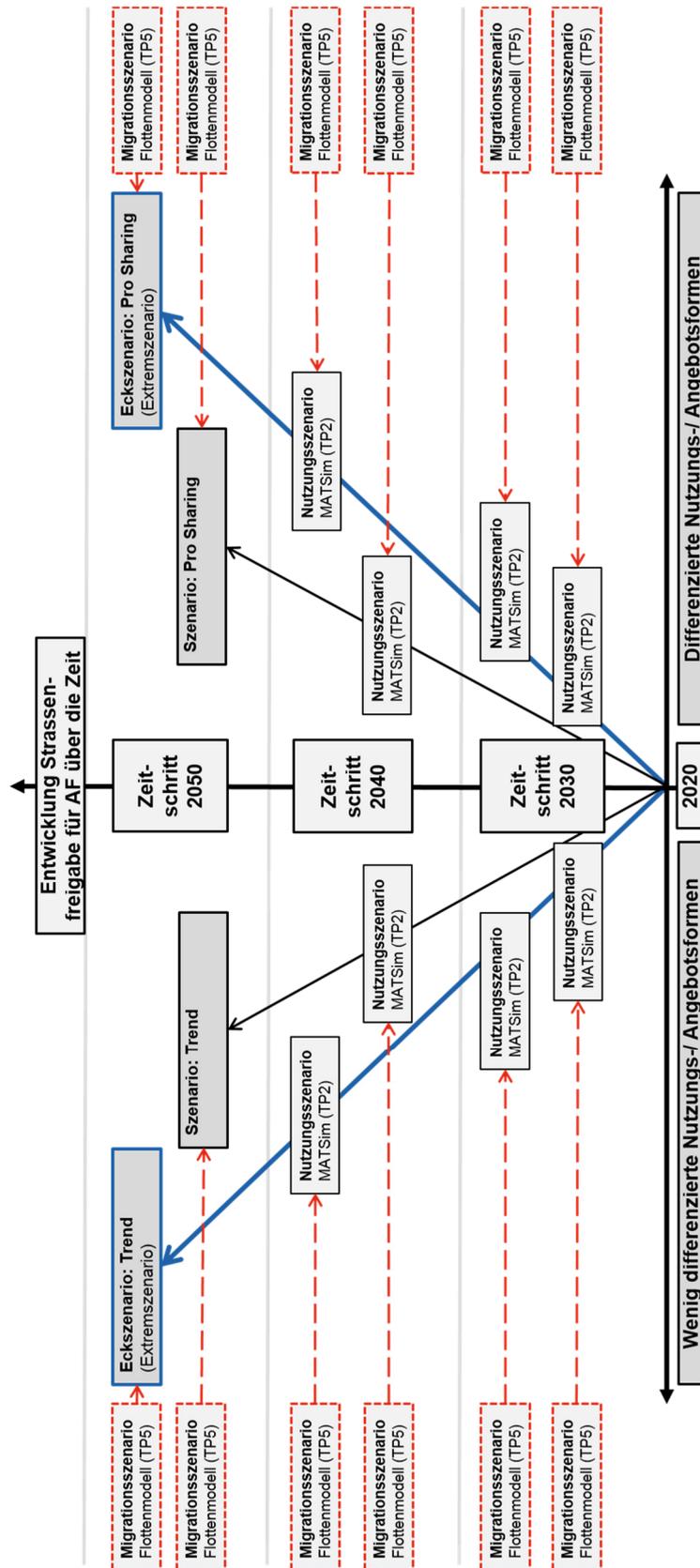
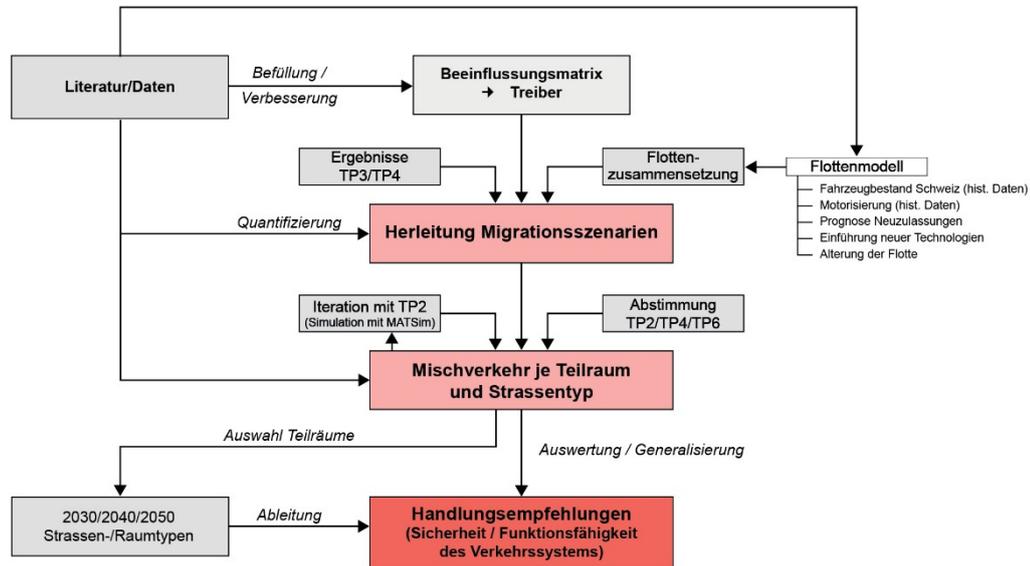


Abb. 5 Übersicht über die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Szenariotypen

### 2.3.3 Abhängigkeiten und Interaktion zwischen den TP

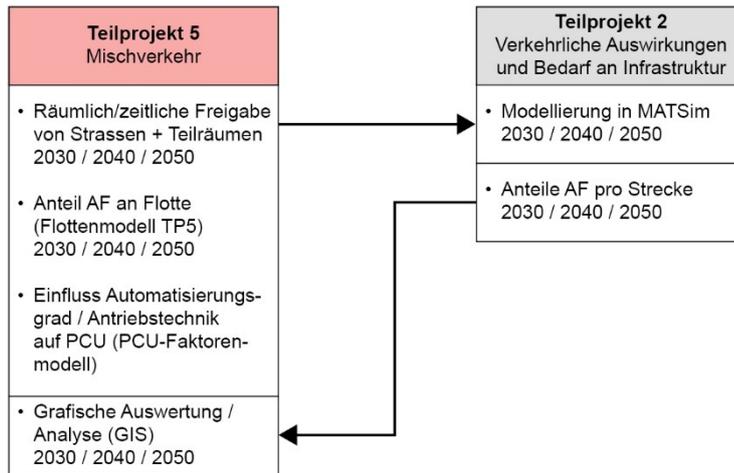
Für die Beantwortung der beiden zentralen Fragen des TP5 (zeitlich-räumliche Durchdringung und Auswirkungen des Mischverkehrs auf die Verkehrssicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems) findet eine (unterschiedlich) starke Interaktion mit den anderen Teilprojekten statt.



**Abb. 6** Inhaltlicher Ablauf TP5 und dessen Interaktion (Austausch) mit den anderen TP

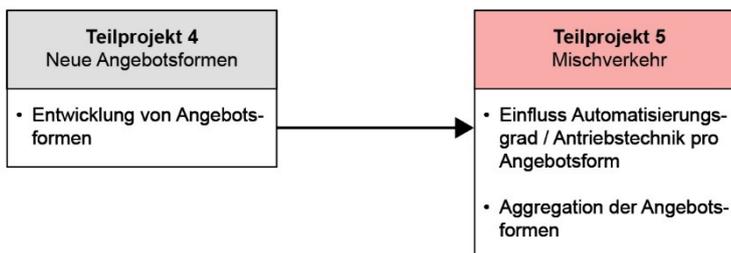
Mit den verschiedenen TP findet ein Austausch statt, der in den folgenden Abschnitten erläutert wird.

Mit dem **Teilprojekt 2** (Verkehrliche Auswirkungen und Bedarf an Infrastrukturen) findet für den Teil der zeitlich-räumlichen Durchdringung von automatisierten Fahrzeugen ein intensiver Austausch statt. Dabei liefert TP5 den Zeitpunkt der Freigabe einzelner Strassentypen und Räume (in Abstimmung mit TP6) für AF, sowie den Anteil und die Art (Angebotsform gemäss TP4) von AF an der Flottengrösse (Ergebnis aus dem Flottenmodell). Zudem liefert TP5 die Auswirkungen bzw. die Veränderungen automatisierten Fahrens auf die so genannten PCU (als Mass für die verkehrstechnische Dimensionierung von Strecken und Knotenpunkten). TP2 modelliert auf Basis dieser Eingangsgrössen die räumliche Nutzung von AF mittels dem agentenbasierten Simulationstool MATSim. Diese MATSim-Berechnungen (u.a. Anzahl der AF-Fahrzeuge pro Strecke/Abschnitt) dienen TP5 als Grundlage für die GIS-gestützte grafische Aufbereitung der Ergebnisse. Zudem werden die MATSim-Ergebnisse für die weiteren Arbeiten bezüglich Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems genutzt.



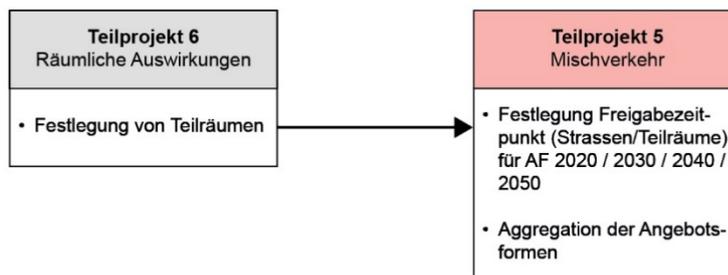
**Abb. 7** Interaktion (Austausch) zwischen TP5 und TP2

**Teilprojekt 4** (Angebotsformen) entwickelt zukünftige Angebotsformen sowohl für den Personen- als auch den Güterverkehr. Diese Angebotsformen sind u.a. durch Informationen zu den physischen Grössen (Kubatur), durch deren Einsatzraum oder die Form ihrer Nutzung (Sharing, Pooling, Platooning) charakterisiert. Für jeden der insgesamt 28 Angebots- bzw. Fahrzeugtypen werden in einem ersten Schritt der Einfluss des Automatisierungsgrades sowie der Antriebstechnik auf die PCU festgelegt. Dies geschieht mit einem für dieses Projekt entwickelten PCU-Faktorenmodell. In einem nächsten Schritt wurden die insgesamt 28 Angebotsformen zu 10 Angebotsformen aggregiert, welche dann für die weiteren Arbeiten (Integration in das Flottenmodell von TP5) genutzt wurden.



**Abb. 8** Interaktion (Austausch) zwischen TP5 und TP4

Mit dem **Teilprojekt 6** (Räumliche Auswirkungen) wurden primär die differenzierten Räume abgestimmt. Insgesamt wurden vier Teilräume definiert und festgelegt: Kernstadt (Zürich), Agglomeration Zürich, ländlicher Raum gerichtet (Kanton Graubünden mit der Kernstadt Chur) und ländlicher Raum ungerichtet (Region Fribourg/Vaud mit der Kernstadt Fribourg/Freiburg). Diese Teilräume dienen TP5 für die zeitlich-räumliche Festlegung der Strassenfreigaben.



**Abb. 9** Interaktion (Austausch) zwischen TP5 und TP6

### 3 Stand der Forschung – Auswirkungen des automatisierten Fahrens

Diese ausführliche Literaturrecherche dient dem Ziel, den aktuellen nationalen und internationalen Forschungsstand, insbesondere im Hinblick auf relevante Einflussgrössen bezüglich Durchdringung und Marktentwicklung von automatisierten Fahrzeugen, sowie der Zusammensetzung einer zukünftigen Fahrzeugflotte einzuordnen. Zusätzlich wurden auf Basis der Literaturrecherche in Kombination mit internen Workshops relevante Einflussgrössen (Treiber) auf die Durchdringung des automatisierten Fahrens ermittelt.

Darüber hinaus sollen bereits erforschte Wechselwirkungen von automatisierten und konventionell geführten Fahrzeugen im Kontext der zentralen Aspekte des TP5 «Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems» aufgezeigt und analysiert werden. Der aktuelle konsolidierte Wissensstand dient dabei als Grundlage für die nachfolgenden Arbeiten, sowie für mögliche Analogieschlüsse und dem Erkennen von Besonderheiten innerhalb der Schweiz im Vergleich mit dem europäischen Ausland.

#### 3.1 Forschungsinitiativen und themenverwandte Projekte in Deutschland und der Schweiz

Insbesondere in Deutschland ist die Thematik der Entwicklung des automatisierten Fahrens von hochgradiger Bedeutung, vor allem auf Grund der ansässigen Automobilindustrie, die diese Entwicklung vorantreibt. Um die vielen offenen Aspekte zusammenzufassen und gezielt Förderprojekte auszuschreiben, wurde ein sog. «Runder Tisch Automatisiertes Fahren» einberufen, der die Forschungsfragen zusammenfasst. Die Themen «Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion», «Funktion, Sicherheit, Absicherung», «Strasseninfrastruktur und Verkehr» sowie «Gesellschaftliche Aspekte» wurden als Schwerpunkte der zukünftigen Forschung identifiziert (Gasser, et al., 2015). Auf Basis dessen wurden entsprechende Förderprojekte initiiert, die die Forschungsschwerpunkte behandeln. Nennenswerte Projekte sind unter anderem Pegasus (Thema Absicherung), Veronika (Thema Verkehrsfluss), digitaler Knoten 4.0 (Thematik Lösungsansätze für den Mischverkehr) und @City (Thema städtischer Mischverkehr). Ausserdem wurden digitale Testfelder auf der Autobahn (A9) sowie in einigen urbanen Gebieten umgesetzt. Bereits in der Vergangenheit wurden innerhalb von Förderprojekten die Entwicklung und Wirkungen des automatisierten Fahrens erforscht. Nennenswerte Projekte sind hierbei simTD, wobei ein deutsches Testfeld zum vernetzten und automatisierten Fahren aufgebaut wurde und Effekte verschiedener Assistenzsysteme evaluiert wurden. Das Projekt UR:BAN behandelte das automatisierte Fahren im urbanen Raum und erforschte auch die Fahrerassistenz im Mischverkehr. In der Schweiz liegen bisher vor allem Initialstudien des SVI und des ASTRA sowie Forschungsergebnisse im Bereich der Auswirkungen auf das Verkehrsverhalten (Auswirkung auf die Nachfrage oder Kosten neuer Mobilitätsformen wie Sharing u.dgl.) durch das Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) (Bösch, et al., 2018) (Meyer, et al., 2016) oder den Städteverband (EBP Schweiz AG, 2017) vor. Darüber hinaus ist die Studie «Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge» (Axhausen, et al., 2018) zu erwähnen. Die bisherigen SVI/ASTRA-Studien sind stark auf die Auswertung vorhandener (mehrheitlich ausländischer) Studien fokussiert. Das vorliegende Forschungspaket stellt somit eine der ersten eigenen umfassenden (Grundlagen-)Forschungen zu den Auswirkungen des automatisierten Fahrens dar.

## 3.2 Einschätzung der Durchdringung und Marktreife des automatisierten Fahrens

Um die Auswirkungen des automatisierten Fahrens in der Schweiz abschätzen zu können ist es zunächst von Relevanz, die aktuelle Entwicklung der Technologie genauer zu betrachten und eine mögliche Marktreife von automatisierten Fahrzeugen abzuschätzen. Auf dieser Grundlage wird in Kapitel 4 die zukünftige Zusammensetzung der Schweizer Fahrzeugflotte berechnet.

Mit der Thematik der Flottenzusammensetzung aus automatisierten und konventionellen Fahrzeugen in den kommenden Jahrzehnten und deren Wirkungen, haben sich in der jüngeren Vergangenheit international einige Wissenschaftler beschäftigt. Im Folgenden sind nennenswerte – für die im Rahmen des TP5 (Mischverkehr) relevante – Arbeiten kurz aufgeführt.

Beiker stellt verschiedene Einführungsszenarien von automatisierten Fahrzeugen vor. Während im evolutionären Szenario davon ausgegangen wird, dass sich die Automatisierung kontinuierlich weiterentwickeln wird, indem beispielsweise heutige Fahrerassistenzsysteme Schritt für Schritt dem Fahrer mehr Fahraufgaben abnehmen, geht man im revolutionären Szenario davon aus, dass ohne Zwischenstufen ein Sprung vom manuell geführten Fahren zum autonomen Fahren gemacht werden kann. Ersteres wird vor allem von klassischen Automobilherstellern avisiert, letzteres von neuen Akteuren wie Technologieunternehmen, die neuerdings in den Automobilmarkt eintreten. Das transformative Szenario geht von einer Änderung der Mobilität hin zu neuen automatisierten Mobilitätsdiensten aus. Solche Entwicklungen sind beispielsweise in Städten, die den öffentlichen Verkehr transformieren oder auf Privatflächen, wie Flughäfen und Einkaufszentren, zu beobachten (Beiker, 2015).

Auch Fraedrich et al. definieren unterschiedliche Szenarien für die Einführung automatisierter Fahrzeuge in die Fahrzeugflotte und erörtern u.a. die Auswirkungen auf die Fahrleistung und den Modal Split. Da insbesondere im Strassengüterverkehr betriebliche Vorteile erwartet werden, ist hier von einer schnelleren Marktdurchdringung der Automatisierung auszugehen als im Privatverkehr (Fraedrich, et al., 2017).

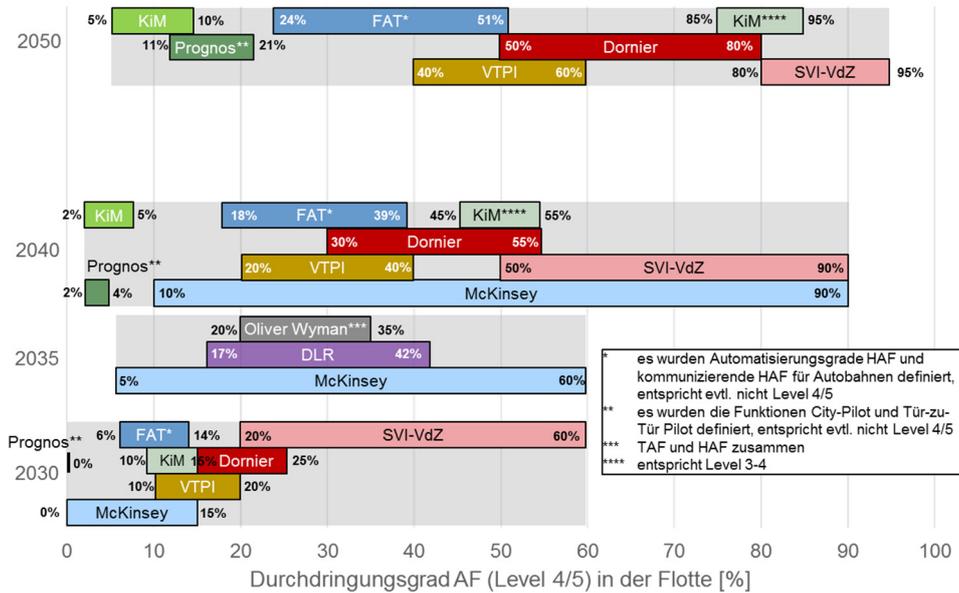
In Fridstrøm et al. wird ein Modell verwendet, welches die Entwicklung der Fahrzeugflotte fortschreibt und dabei regulatorische Aspekte berücksichtigt. Dabei werden konkrete Werte für die Flottenzusammensetzung errechnet (Fridstrøm, et al., 2016).

Auf Basis der Methodik von Fridstrøm et al. wird innerhalb des Projektes «Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstrasseninfrastruktur Deutschlands» ein Diffusionsmodell für Deutschland entwickelt, um die Marktdurchdringung von Assistenz- und Automatisierungsfunktionen in deutschen Fahrzeugen zu prognostizieren. Hierbei wurde zunächst auf Basis von historischen Daten über die Altersverteilung und Neuzulassungen von Fahrzeugen die zukünftige Fahrzeugflotte errechnet. Über die Einführung der Automatisierungsfunktionen wurden Annahmen auf Grund von Expertenschätzungen getroffen. Ebenfalls mittels historischer Daten und Analogien zu anderen Assistenzfunktionen wurde die Marktdurchdringung der Funktionen in die deutsche Fahrzeugflotte berechnet (Krause, et al., 2017).

Die Konsumentenumfrage von Abraham et al. stellte vor allem Fragen zu Vertrauen gegenüber automatisierten Fahrzeugen und möglichen Transportalternativen. Sie fanden heraus, dass autonome Fahrzeuge ein enormes Potenzial zur Steigerung der Mobilität, vor allem für demografische Randgruppen, bieten. Allerdings ist gerade bei den älteren Nutzern das Vertrauen in die Technologie noch nicht vorhanden und muss erst über die Zeit aufgebaut werden. Darüber hinaus konnten sie herausfinden, dass Gewohnheit und wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit neuer Technologien direkt mit deren Akzeptanz korrelieren (Abraham, et al., 2016).

Das TP1 des vorliegenden ASTRA Forschungsprojektes «Auswirkungen des automatisierten Fahrens» liefert qualitative Aussagen zur Marktreife und Durchdringung der Fahrzeugflotte von automatisierten Fahrzeugen sowohl im Personen-, als auch im Güterverkehr in der Schweiz. Das TP5 wird diese Annahmen im Folgenden kritisch prüfen und im weiteren Verlauf mithilfe eines Flottenmodells für verschiedene Szenarien wahrscheinliche AF-Anteile der Fahrzeugflotte herleiten, sowie eine Differenzierung nach Raum und Strassentyp einführen.

Der Vergleich der Annahmen zur Automatisierung des Personenverkehrs zwischen verschiedenen internationalen Studien, welche eine Durchdringung von AF in der Fahrzeugflotte betrachten zeigt, dass die angenommene Flottendurchdringung über alle Zeitschritte relativ stark streut; vgl. *Abb. 10*. Es ist zu beachten, dass die Resultate aufgrund unterschiedlicher Annahmen nicht uneingeschränkt miteinander vergleichbar sind.



**Abb. 10** Durchdringungsgrad AF im Personenverkehr (Level 4/5) in der Flotte [%]

Die Werte von sieben verschiedenen Studien für die Zeitschritte 2030 bewegen sich im Bereich von 0 % bis 60 % AF-Flottendurchdringung. Fünf Jahre später liegen drei Studien in einem Bereich zwischen 5 % und 60 %. Im Jahr 2040 prognostizieren acht unterschiedliche Studien einen AF-Anteil zwischen 2 % und 90 %. 2050 bewegen sich die vorhergesagten Anteile zwischen 5 % und 95 %. Es ist erkennbar, dass die Streuung teilweise sogar innerhalb Vorhersagen sehr hoch ist, was zu sehr gestreckten Wertebereichen führt. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Wertebereiche, je weiter man in die Zukunft blickt, grösser werden. Die einzelnen Studien sowie deren Urheber können der *nachfolgenden Tab. 2* entnommen werden.

Der Vergleich einer Schweizer (SVI-VdZ 2017/003; (EBP Schweiz AG und Rapp Trans AG, 2018)) und einer deutschen (FAT-Studie; (Krause, et al., 2017)) Studie bezüglich der Automatisierung des Güterverkehrs ergibt folgendes Bild (vgl. Abb. 11). Auch hier gilt es zu beachten, dass die Annahmen teilweise differieren und die direkte Vergleichbarkeit der Werte einschränken.

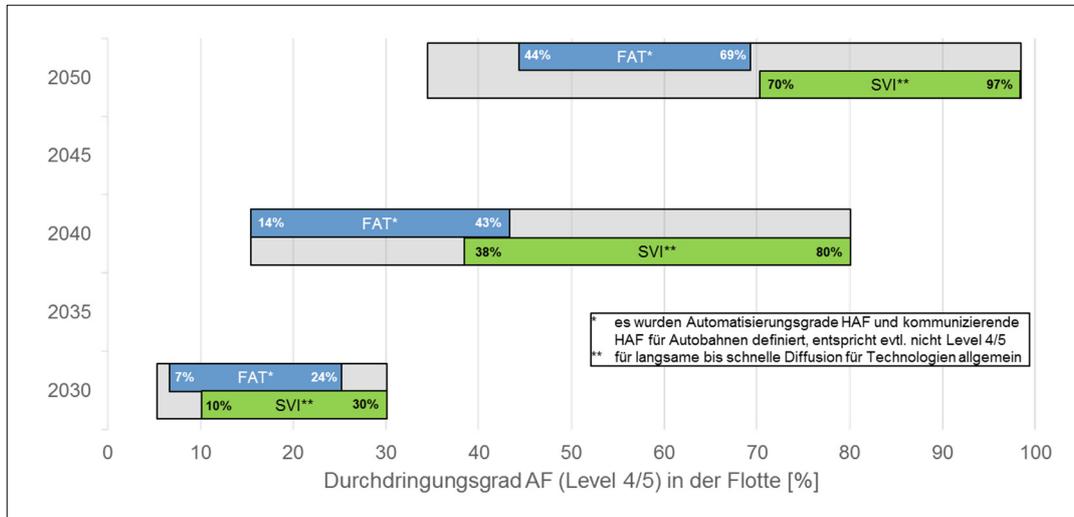


Abb. 11 Durchdringungsgrad AF im Güterverkehr (Level 4/5) in der Flotte [%]

Im Jahr 2050 sagt die deutsche FAT-Studie Anteile von 44 % bis 69 % und der SVI von 70 % bis 97 % voraus.

Die in den eben beschriebenen Studien getätigten Aussagen sollen anhand folgender Abb. 12 noch weiter differenziert werden. Diese stellt Aussagen zur Technologiereife von grossen Unternehmen wie Ford oder Daimler in Bezug zu den Annahmen einiger Studien bzw. Forschungseinrichtungen. Die einzelnen Studien, sowie deren Urheber können Tab. 2 entnommen werden.

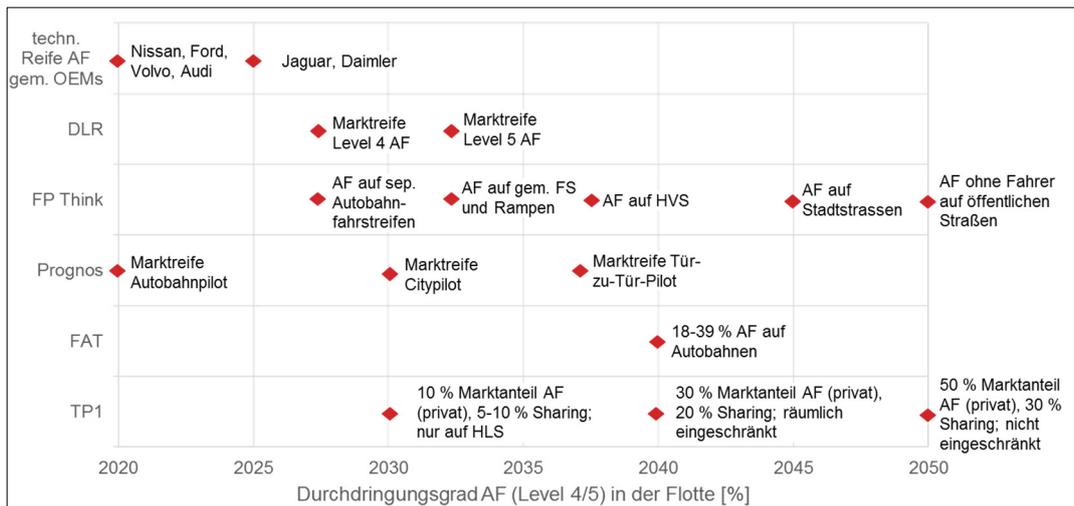


Abb. 12 Durchdringungsgrad AF (Level 4/5) in der Flotte je Jahresscheibe

Es ist zu erkennen, dass die Aussagen der OEM von einer eher frühen Marktreife ausgehen, wohingegen vor allem die Aussagen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und FP Think eine spätere Marktreife vermuten lassen.

**Tab. 2** Auflistung der untersuchten Studien zur Durchdringung von AF in der Flotte

Kurzbezeichnung	Quelle	Jahr und AF-Durchdringung
FAT	(Krause, et al., 2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2030 → 5-15 %*</li> <li>• 2040 → 25-45 %*</li> <li>• 2050 → 50-80 %*</li> </ul>
SVI-VdZ 2017/003	(EBP Schweiz AG und Rapp Trans AG, 2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2030 → 20-60 %</li> <li>• 2040 → 50-90 %</li> <li>• 2050 → 80-95 %</li> </ul>
KIM	(KIM Netherlands Institute for Transport Policy Analysis, 2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2040 → 2-5 %, 45-55 %****</li> <li>• 2050 → 5-10 %, 85-95 %****</li> </ul>
Dornier	(Barthelmes, et al., 2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2030 → 15-25 %</li> <li>• 2040 → 30-55 %</li> <li>• 2050 → 50-80 %</li> </ul>
Prognos	(Altenburg, et al., 2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2030 → 0 %**</li> <li>• 2040 → 2-4 %</li> <li>• 2050 → 11-21 %</li> </ul>
VTPI	(Litman, 2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2030 → 10-20 %</li> <li>• 2040 → 20-40 %</li> <li>• 2050 → 40-60 %</li> </ul>
McKinsey	(McKinsey&Company, 2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2030 → 0-15 %</li> <li>• 2035 → 5-60 %</li> <li>• 2040 → 10-90 %</li> </ul>
Oliver Wyman	(Oliver Wyman, 2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2035 → 20-35 %***</li> </ul>
DLR	(Fraedrich, et al., 2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2035 → 17-42 %</li> </ul>
FP Think	(Bierstedt, et al., 2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2025-2030: AF auf separaten Autobahnfahrstreifen</li> <li>• 2030-2035: AF auf gem. FS und Rampen</li> <li>• 2035-2040: AF auf HVS</li> <li>• 2040-2050: AF auf Stadtstrassen</li> <li>• 2050+: AF ohne Fahrer auf öffentlichen Strassen</li> </ul>
OEM	(VDV Die Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), 2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2020 bzw. 2025 Marktreife AF</li> </ul>

Legende: \* bis \*\*\*\* siehe Abb. 10

### 3.3 Treiberanalyse zur vertieften Einschätzung der Durchdringung und Marktreife des automatisierten Fahrens

Neben der umfangreichen Literaturrecherche wurden zusätzlich interne Workshops abgehalten, in denen relevante Einflussgrößen (Treiber) auf die Durchdringung des automatisierten Fahrens ermittelt wurden. Diese können Tab. 3 entnommen werden.

Diese Treiberanalyse dient dazu, zu erkennen, welche Treiber in welcher Bedeutung (primär/ sekundär) einen Einfluss auf die Durchdringung automatisierter Fahrzeuge haben werden. Für die im Kapitel 4 verfassten Migrationsszenarien spannt die Treiberanalyse den Betrachtungsraum auf und dient zur Plausibilisierung der angenommenen Parameter. Zukünftig ist es denkbar, das Flottenmodell zu erweitern und die Treiber zu integrieren (Wirkungsmodell).

**Tab. 3 Treiber für die Einführung von automatisierten Fahrzeugen inkl. Beschreibung**

<b>Treiber</b>	<b>Beschrieb</b>
Einschränkung Zulassung	Beschränkte Zulassung von AF auf einzelnen Strassentypen und/oder Regionen.
Haftungsfragen (Mensch vs. Maschine)	Thematik neuer Haftungsfragen im Kontext einer begrenzten Toleranz bei technischen Ausfällen (Winkle, 2015). Umgang mit der Thematik lernfähiger Systeme und deren Einfluss auf die Haftpflicht des (Software-) Herstellers.
Staatliche Förderung (Subventionen und Regulierung)	Einfluss einer staatlichen Förderung (bspw. Zuschüsse bei Neukauf oder Reduktion der Fahrzeugsteuer) mit dem Ziel einer aktiven Beeinflussung von Kaufentscheidungen. Verbote möglicher Fahrzwecke (bspw. mit dem Ziel einer Verringerung von Leerfahrten von Robotertaxis).
Fahrkomfort (Fahrdynamik)	Technische Sicherstellung des Fahrkomforts von AF bzw. Steigerungseffekte von AF auf den Fahrkomfort.
Betriebsstabilität (Betriebszustände)	AF-induzierte Effekte auf die Betriebsstabilität des (MIV-) Verkehrssystems. Dies bspw. durch die Nutzbarkeit kürzerer Zeitlücken an Knotenpunkten (Friedrich, 2015) oder auf Strecken (Krause, et al., 2017). Daraus ergeben sich «die Möglichkeiten einer verbesserten Ausnutzung der vorhandenen Infrastruktur und eine Stabilisierung des Verkehrsablaufs» (Friedrich, 2015).
Verkehrsablauf und Zuverlässigkeit der Kommunikation	Effizienz des Verkehrsablaufs mit automatisierten Fahrzeugen und Berücksichtigung der Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit des Kommunikationssystems.
Strasseninfrastruktur (Sensorik/Kommunikationssysteme)	Anforderungen an die Strasseninfrastruktur zur Sicherstellung eines sicheren und zuverlässigen Betriebs mit automatisierten Fahrzeugen. Hier steht neben der Verfügbarkeit auch die Zuverlässigkeit im Fokus.
Kommunikation Car2Car (automatisiert/automatisiert)	(Technische) Anforderungen und Verfügbarkeit der Kommunikation zwischen automatisierten Fahrzeugen.
Kommunikation Car2Car (automatisiert/konventionell)	(Technische) Anforderungen und Verfügbarkeit der Kommunikation zwischen automatisierten und fahrer-gesteuerten Fahrzeugen.
Kommunikation Car2Infrastruktur (AF/Infrastruktur)	(Technische) Anforderungen und Verfügbarkeit der Kommunikation zwischen automatisierten Fahrzeugen und der Infrastruktur (insb. Knotenpunkte).
Verkehrsleitsysteme (Infrastruktur)	(Technische) Anforderungen und Verfügbarkeit von Verkehrsleitsystemen mit Fokus der Steuerung der einzelnen Fahrzeuge (Routenwahl mit Fokus Systemoptimum) als auch von Flotten (Disposition von Sharing-Fahrzeugen und Robotertaxis).
Gesellschaftliche Technologie-Akzeptanz	Für die Akzeptanz einer konkreten Technologie wie dem automatisierten Fahren bedeutet dies, dass sowohl auf individueller als auch auf gesellschaftlicher Ebene neben technischen Optionen verschiedene Nutzungsoptionen oder auch Risikobefürchtungen gegeneinander abgewogen werden. Dabei spielt insbesondere auch der Faktor der (Versicherungs-)rechtlichen Frage eine zentrale Rolle.
Akzeptanz (neuer) Mobilitätsformen	Akzeptanz neuer Angebotsformen wie Car-on-Demand bzw. Mobility-on-Demand in der Bevölkerung und den Unternehmen. (Bratzel & Teller mann, 2018)

Treiber	Beschrieb
Entwicklung ÖV	Entwicklung des öffentlichen Verkehrs sowohl im Fernverkehr, dem Nahverkehr und auf der letzten Meile. Damit bestehen klare Unterschiede zwischen dem ländlichen und dem städtischen Raum; vgl. (VDV Die Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), 2015). Gemäss Dornier, (Barthelmes, et al., 2017) kann «ein flexibler und direkter Shuttleverkehr den ÖPNV durch bessere direkte Verbindungen attraktiver machen und dabei neue Fahrgastgruppen erschliessen».
Umweltbewusstsein	Gesteigertes Umweltbewusstsein als Einflussgrösse für die Wahl des Verkehrsmittels. Gemäss ifmo (Institut für Mobilitätsforschung, 2015) sind steigende ökologische Verantwortung und der Erwartungsdruck im sozialen Umfeld ein Treiber für die wachsende multimodale Orientierung der Gesellschaft.
Ausweitung Nutzergruppen	Potenzial zur Erschliessung neuer Nutzergruppen bzgl. automatisierter Fahrzeuge, da diese für fahrgesteuerte Fahrzeuge entweder noch zu jung oder schon zu alt (fehlende Fahrtüchtigkeit) sind.
Intramobilität (Planungsmöglichkeit von Wegeketten)	Möglichkeiten zur Planung und Nutzung von mehreren Mobilitätswerkzeugen auf einem Weg unter Einbezug automatisierter Fahrzeuge (bspw. für die erste oder letzte Meile). Aktive Einbindung von automatisierten Fahrdiensten in MaaS als eine «bruchlose, hoch vernetzte Reise- bzw. Mobilitätskette». (Bratzel & Tellermann, 2018)
Fahrzeugnutzung (privat/Sharing)	Differenzierung zwischen privatem Besitz von automatisierten Fahrzeugen (Kauf oder Leasing) und Fahrzeugnutzung (Pay-per-use, Flatrate). Innerhalb der Fahrzeugnutzung erfolgt eine Unterscheidung zwischen privaten Fahrdiensten (Fahrgast fährt alleine und Robotertaxis sog. «Pods») und Sharing-Diensten (Pooling oder Robo-Shuttle-on-demand). Vgl. hierzu auch Centre of Automotive Management (Bratzel & Tellermann, 2018) und Ergebnisse des TP4 (neue Angebotsformen).
Grad der Nutzungsflexibilität	Grad der Nutzungsflexibilität; definiert unter anderem aus den Determinanten zeitliche und räumliche Verfügbarkeit, Wartezeit, Auswahl an Fahrzeugtypen (Grösse, Komfortstufe, Ausstattung) und technisch/betriebliche Zuverlässigkeit. (Lenz & Fraedrich, 2015)
Fahrzeugarten	Grösse und Art der Fahrzeuge. Vergleiche hierzu die Ergebnisse aus TP4 (neue Angebotsformen).

Grundsätzlich beeinflussen die oben genannten einzelnen Treiber nicht nur in unterschiedlicher Stärke die Durchdringung des automatisierten Fahrens, sondern sich auch gegenseitig. Diesen Aspekt der gegenseitigen Beeinflussung gilt es im Hinblick auf die Modellierung der Flottendurchdringung mithilfe des Flottenmodells (vgl. dazu Kapitel 4.3) zu berücksichtigen. Um innerhalb der Einflussgrössen die stärksten erkennen zu können, wurde die Beeinflussungsmatrix nach Gomez und Probst (Gomez & Probst, 1987) in ihrer modifizierten Form (Haberfellner, et al., 2002) angewendet. Diese Methode dient zur Betrachtung und Analyse komplexer Wirkungszusammenhänge. Dabei wird die Stärke der Einflüsse einzelner Einflussgrössen auf die jeweils anderen Einflussgrössen auf einer Skala von 0 (kein Einfluss) bis 3 (grosser Einfluss) geschätzt. Durch die Ermittlung der Zeilen- (Aktivsumme) und der Spaltensumme (Passivsumme) lassen sich Rückschlüsse auf den Beeinflussungsgrad ableiten. Je höher der Quotient der Aktivsumme zur Passivsumme ( $\times 100$ ) ist, desto grösser ist der Einfluss eines Elements auf die anderen Elemente. Diese Methode ermöglicht es, die Stärke der einzelnen Treiberelemente innerhalb aller relevanten Treiber zu bestimmen.

Übersicht der relevanten Faktoren für das automatisierte Fahren	Einschränkung Zulassung		Haftungsfragen		Staatl. Förderung (Kaufsubvention)		Fahrkomfort (Fahrdynamik)		Betriebsstabilität (Betriebszustände)		Verkehrsablauf und Zuverlässigkeit Kom.		Strasseninfrastruktur (Sensorik)		separate Fahrstreifen für AF		Kommunikation Car2Car (AF/AF)		Kommunikation Car2Car (AF/conv.)		Car2Infrastruktur (Kom. AF/Infrastruktur)	
Beinflussungsmatrix (aus Habnerfeller, et.al.) nach Vester	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Grad der Beeinflussbarkeit	924	720	361	728	1080	1505	1386	440	420	20	420	19	380	42	380	420	420	420	420	420	420	420
Einschränkung Zulassung	xxx	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Haftungsfragen	xxx	xxx	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Staatl. Förderung (Kaufsubvention)	0	0	xxx	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fahrkomfort (Fahrdynamik)	1	1	0	xxx	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Betriebsstabilität (Betriebszustände)	2	2	0	0	xxx	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Verkehrsablauf und Zuverlässigkeit Kom.	3	3	0	0	xxx	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Strasseninfrastruktur (Sensorik)	2	2	0	0	0	xxx	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Separate Fahrstreifen für AF	3	3	0	0	0	xxx	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Kommunikation Car2Car (AF/AF)	3	3	0	0	0	xxx	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Kommunikation Car2Car (AF/conv.)	3	3	0	0	0	xxx	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Kom. Car2Infrastruktur (AF/Infrastruktur)	3	3	0	0	0	xxx	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Verkehrssysteme (Infrastruktur)	3	3	0	0	0	xxx	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Technologie-Akzeptanz	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Akzeptanz (neue) Mobilitätsfirmen	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Entwicklung SPNV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Umweltbewusstsein	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ausweitung Nutzergruppen (z.B. U18)	1	1	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Intramobilität	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fahrzeugnutzung (privat/sharing)	3	3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nutzungsflexibilität	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fahrzeugarten (Grösse, Sitzpl.)	0	0	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Grad der Beeinflussbarkeit	22	18	19	26	27	35	33	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Aktivsumme * Passivsumme	924	720	361	728	1080	1505	1386	440	420	20	420	19	380	42	380	420	420	420	420	420	420	420
Übersicht der relevanten Faktoren für das automatisierte Fahren																						
Beinflussungsmatrix (aus Habnerfeller, et.al.) nach Vester																						
Einschränkung Zulassung	2	2	3	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Haftungsfragen	2	2	3	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Staatl. Förderung (Kaufsubvention)	0	0	2	2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Fahrkomfort (Fahrdynamik)	1	1	2	2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Betriebsstabilität (Betriebszustände)	2	2	2	2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Verkehrsablauf und Zuverlässigkeit Kom.	2	2	2	2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Strasseninfrastruktur (Sensorik)	2	2	2	2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Separate Fahrstreifen für AF	3	3	2	2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Kommunikation Car2Car (AF/AF)	3	3	2	2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Kommunikation Car2Car (AF/conv.)	3	3	2	2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Kom. Car2Infrastruktur (AF/Infrastruktur)	3	3	2	2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Verkehrssysteme (Infrastruktur)	3	3	2	2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Technologie-Akzeptanz	xxx	xxx	3	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Akzeptanz (neue) Mobilitätsfirmen	2	2	xxx	xxx	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Entwicklung SPNV	1	1	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Umweltbewusstsein	2	2	2	2	xxx	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Ausweitung Nutzergruppen (z.B. U18)	0	0	0	0	0	xxx	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Intramobilität	2	2	3	3	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Fahrzeugnutzung (privat/sharing)	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Nutzungsflexibilität	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Fahrzeugarten (Grösse, Sitzpl.)	0	0	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Grad der Beeinflussbarkeit	20	45	40	43	8	40	39	43	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Aktivsumme * Passivsumme	460	900	920	903	144	640	1404	1849	1320	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992	992

Abb. 13 Beeinflussungsmatrix zur Bestimmung der relevanten Treiber

Die identifizierten Treiber werden nun zu Treibergruppen zusammengefasst, um die Komplexität der Einflussgrößen auf die Durchdringung automatisierter Fahrzeuge zu reduzieren und gleichzeitig die relevanten Treibergruppen zu erkennen. Dabei wird zwischen Primär- und Sekundärtreibern unterschieden (vgl. Kapitel 3.3.1 und 3.3.2 sowie *Tab. 4*).

**Tab. 4** Treibergruppen, unterteilt nach Primär- und Sekundärtreibern

Treibergruppen	Treiber
Primärtreiber «Technische Verfügbarkeit»	Fahrkomfort (Fahrodynamik)
	Betriebsstabilität (Betriebszustände)
	Verkehrsablauf und Zuverlässigkeit Kommunikation
	Kommunikation Car2Car (automatisiert/automatisiert)
	Kommunikation Car2Car (automatisiert/konventionell)
	Kommunikation Car2Infrastruktur (AF/Infrastruktur)
Primärtreiber «Haftungs-/Versicherungsfragen»	Haftungsfragen (Mensch vs. Maschine)
Primärtreiber «Nutzungsform»	Fahrzeugnutzung (privat/Sharing)
Primärtreiber «Investitionskosten»	Umweltbewusstsein
	Staatliche Förderung (Subventionen und Regulierung)
Sekundärtreiber «Räumliche Regulierung bzw. Zulassung»	Einschränkung Zulassung
Sekundärtreiber «Ausstattung Strasseninfrastruktur» (Sensorik, Kommunikationseinrichtungen)	Strasseninfrastruktur (Sensorik/ Kommunikationssysteme)
	Verkehrsleitsysteme (Infrastruktur)
Sekundärtreiber «Strassennutzbarkeit»	Mischverkehr/separate Fahrstreifen für AF

### 3.3.1 Primärtreiber

Primärtreiber haben einen direkten und starken Einfluss auf die Durchdringung automatisierter Fahrzeuge (Anteil automatisierter Fahrzeuge am Flottenbestand) und umfassen – abgeleitet aus der oben beschriebenen Beeinflussungsmatrix – die folgenden Treiber:

#### Primärtreiber «Technische Verfügbarkeit»

Die absolute zentrale Voraussetzung für die Durchdringung bzw. Nutzung von automatisierten Fahrzeugen (AF) sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr ist die technische Verfügbarkeit (sowohl bzgl. der Fahrzeuge als auch bzgl. der Kommunikation). Die Industrie geht in entsprechenden Äusserungen in den Medien für den Level 4/5 von folgenden Zeitpunkten aus (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), 2015):

- Nissan Executive Vice-President Palmer: «Nissan will make fully autonomous vehicles available to the consumer by 2020».
- Ford CEO Mark Fields: «Fully autonomous vehicles on the market by 2020».
- Jaguar/Land Rover Director of R&D Epple: «Fully autonomous driving will happen within 10 Years (=2024)».
- Daimler CEO Zetsche: «Fully autonomous vehicles that drive without human intervention in the market by 2025».
- Stefan Moser, Head of Product and Technology Communications: «Next generation Audi A8 capable of fully autonomous driving in 2017».
- Volvo will 2017 100 voll autonome Fahrzeuge auf bestimmten Strecken rund um Göteborg einsetzen.

Im Rahmen einer Experten/Delphi-Umfrage (SVI, 2017/003) gehen die dort befragten Personen davon aus, dass in 10 bis 15 Jahren automatisierte Fahrzeuge der Stufe 4/5 verfügbar sein werden. Dies bedeutet, dass ab ca. 2025 bis 2030 die Fahrzeuge – technisch gesehen – einsatzbereit sein werden. Es gilt hier noch zwischen automatisierten Fahrzeugen mit und ohne Kommunikation zu unterscheiden (Krause, et al., 2017). In der vorliegenden Studie wird davon ausgegangen, dass ab 2025 automatisiertes Fahren mit Kommunikation möglich sein wird.

Abb. 14 zeigt, dass frühestens für das Jahr 2020 automatisierte Fahrzeuge Level 4/5 einsatzbereit bzw. zugelassen sein werden. Dies bestätigt auch eine Auswertung der Ankündigungen bzw. der Aussagen der relevanten Fahrzeughersteller bzw. Zulieferer (in Abhängigkeit des Zeitpunkts der gemachten Aussage bzw. Ankündigung) hinsichtlich der Nutzbarkeit von automatisierten Fahrzeugen. Dabei ist dem Umstand Rechnung zu tragen, dass solche Aussagen auch immer unter dem Aspekt einer gewissen medialen Aufmerksamkeit geschuldet sind. Gleichzeitig ist festzustellen, dass die Hersteller mit ihren Ankündigungen zunehmend vorsichtiger geworden sind. Insofern gilt für das Flottenmodell (vgl. Kapitel 4.3), dass 2020 noch keine AF im Normalbetrieb (Ausnahmen bilden Testfelder) in der Fahrzeugflotte vorhanden sein werden.

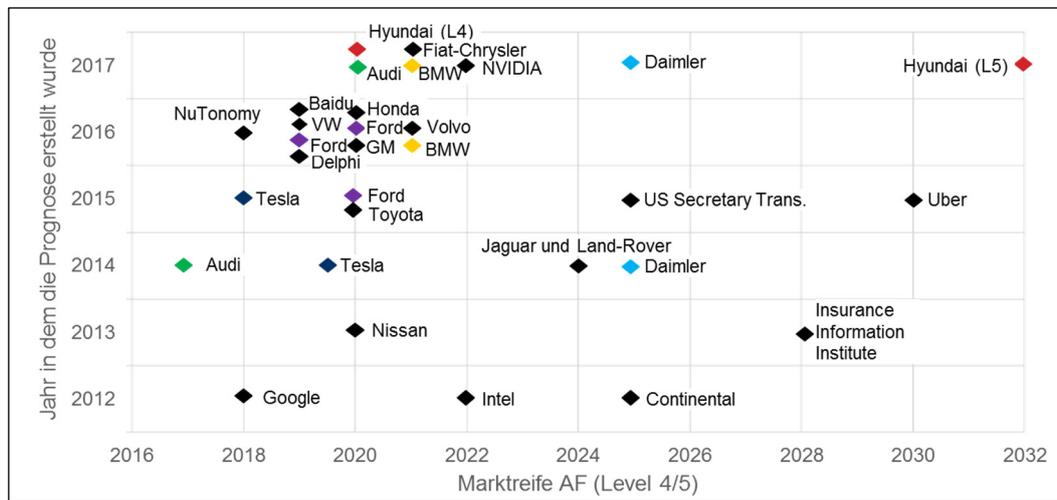


Abb. 14 Aussagen zur Marktreife des AF-Level 4/5 einschlägiger Unternehmen

**Primärtreiber «Haftungs-/Versicherungsfragen»**

Eine abschliessende Klärung und Festlegung der Haftungs- und Versicherungsfragen ist eine zentrale Voraussetzung für eine Zulassung von AF auf dem Strassennetz. Erst wenn diese Voraussetzungen geklärt sind, werden AF auch von den Kunden gekauft. Auch in der Expertenbefragung wird dieser Aspekt mehrfach genannt (EBP Schweiz AG und Rapp Trans AG, 2018), dabei stellt im Zusammenhang mit AF auch die Produkthaftung eine zentrale Thematik dar (Gasser, 2015). Es stellt sich in diesem Kontext auch die Frage, wie weit ein AF-System durch den Insassen noch übersteuert werden kann und soll. Wachenfeld (Wachenfeld, et al., 2015) unterscheidet für die drei Ebenen der Fahraufgaben (Navigationsebene, Bahnführungsebene und Regelungsebene) vier Varianten für die Befugnis der Insassen eines Fahrzeugs während einer (automatisierten) Fahrt, je nachdem, ob diese die Möglichkeit und auch die Befugnis haben, in die Fahraufgabe einzugreifen (vgl. Tab. 5).

Tab. 5 Befugnisse des Insassen nach (Wachenfeld, et al., 2015)

Variante	Möglichkeit des Eingriffs, vorgegeben durch das Fahrzeugkonzept	Befugnis zum Eingreifen, die die Instanz besitzt
a)	auf allen drei Ebenen (Navigation, Bahnführung und Regelung)	auf allen drei Ebenen
b)	auf allen drei Ebenen	keine (z.B. Minderjähriger als Fahrzeugführer)
c)	keine	auf allen drei Ebenen (z.B. Fahrer auf Rücksitz, der nicht eingreifen kann)
d)	auf einer bestimmten Ebene	auf einer anderen Ebene

Im Jahr 2014 wurde von den Mitgliedstaaten der UN beschlossen, die Wiener Konvention dahingehend anzupassen, dass es dort nun heisst: «Systeme, die für den Fahrer übersteuerbar oder abschaltbar sind, erfüllen die geforderte Beherrschung durch den Fahrer»; (Dudenhöffer, 2016). Das modifizierte Abkommen bedingt also weiterhin die Beherrschung durch den Insassen. Wenn dieser nicht (mehr) in der Lage ist das Fahrzeug zu führen (bspw. infolge starker Alkoholisierung), muss das System automatisch stoppen. Diese Formulierung reicht jedoch bei weitem nicht aus, um die Vision von automatisiert fahrenden Robotertaxis Wirklichkeit werden zu lassen.

### **Primärtreiber «Nutzungsform»**

Die Nutzungsform der AF lässt sich in die zwei Eckszenarien (nach TP1 des vorliegenden Forschungsprojekts) unterteilen:

- A: Individuelle und monomodale Nutzungsformen (Eigenbesitz und emotionale Nutzung des Fahrzeugs)
- B: Kollektive und multimodale Nutzungsformen (geteilte und rationale Nutzung des Fahrzeugs)

Diese beiden Nutzungsformen haben einen starken Einfluss auf den Kauf und somit die Durchdringung der AF in der Fahrzeugflotte.

Es ist davon auszugehen, dass beim Car-Sharing (Nutzungsform B) die Beschaffung und Einflottung der AF primär durch Sharing-Betreiber erfolgt und der Anteil der privat gekauften AF bedeutend geringer sein wird als bei der Nutzungsform A (Heinrichs, 2015). Im Kontext von Sharing gilt es auch zu beachten, dass gerade diese Nutzungsform für die Fahrzeugindustrie eine enorme Chance bietet, um ein neues Geschäftsfeld zu etablieren (Barthelmes, et al., 2017). Gemäss dem Centre of Automotive Management (Bratzel & Tellermann, 2018) dürften sich die bisherigen drei Grundprinzipien der Autoindustrie («der Verbrennungsmotor als Kern der automobilen Wertschöpfung», «die Endkunden mit dem Wunsch zum Kauf und Besitz von Autos» und «das Auto muss manuell durch einen ausgebildeten Fahrer gesteuert werden») zunehmend an Bedeutung verlieren.

Insbesondere das zweite Grundprinzip, der Wunsch der Menschen zum Kauf und Besitz eines Autos, verliert vor allem in den Ballungsräumen an Bedeutung. Gerade in der jungen Generation verliert das Auto zunehmend seinen Stellenwert als wichtiges Statussymbol, während alternative Nutzungsformen wie Car-Sharing und Fahrdienste an Bedeutung gewinnen.

Ebenso bietet diese Angebotsform die Chance, den öffentlichen Verkehr – vor allem im ländlich geprägten Raum – zu stärken oder zumindest einen Anteilsverlust zu verhindern. Zudem ermöglichen Sammelverkehrsangebote mit autonomen Fahrzeugen nicht nur das heutige Mass an ÖPNV-Angeboten aufrecht zu halten, sondern auch die Qualität des Mobilitätsangebots deutlich zu steigern (von Mörner & Boltze, 2018).

### **Primärtreiber «Investitionskosten»**

Im Hinblick auf die Durchdringung automatisierter Fahrzeuge stellen die Kosten für die Anschaffung und den Betrieb eine relevante Grösse dar. Bösch (Bösch, et al., 2018) stellt fest, dass sich die Kostenstruktur von privaten AF kaum ändern wird. Die Hauptkosten werden weiterhin die Abschreibungen sein. Eine zentrale Grösse wird letztlich der Kaufpreis sein. Hier stellt sich die Frage, ob automatisierte Fahrzeuge letztlich zu vergleichbaren Preisen wie heutige konventionelle Fahrzeuge (mit den heute am Markt verfügbaren Assistenzsystemen) gekauft werden können. Im Moment werden die Kosten (bspw. Lasertechnik LIDAR als noch zu hoch eingestuft). Gemäss Aussagen in der Wirtschaftswoche (Automobilwoche, 2015) dürfte die Lasertechnik bis 2020 deutlich günstiger werden. Zurzeit verbaut die Firma Bosch in ihre Testwagen für Testzwecke Technik in der Grössenordnung von rund 500'000 Euro. Gemäss den Erkenntnissen von Bosch wäre der Kunde bereit, für diese AF-Technologie zwischen 3'000 Euro und 5'000 Euro zusätzlich auszugeben. Hohe Investitionskosten (zu Beginn der Verfügbarkeit von AF) spricht für Sharing-Flottenbetreiber als Erstkunden.

Im Kontext der Investitionskosten stellt sich letztlich auch die Frage, wie weit (politisch/gesellschaftlich gewollt) der Kauf von automatisierten Fahrzeugen subventioniert werden soll, um letztlich eine Steigerung der Sicherheit (z.B. Reduktion der Unfälle) oder eine Verringerung der Investitionskosten für Strassenausbauten infolge AF-induzierter Kapazitätssteigerungen (Krause, et al., 2017) zu ermöglichen. Vor allem bietet sich die Chance dank Sharing-Angeboten, das Verkehrsaufkommen zu reduzieren und in der Folge den Flächen- und den Energiebedarf sowie die verkehrsbedingten Lärm- und Schadstoffemissionen spürbar zu senken (Schweizerische Eidgenossenschaft, 2016).

### **3.3.2 Sekundärtreiber**

Diese Treiber haben keinen direkten Einfluss die Entwicklung der Fahrzeugtechnik und die damit verbundene Marktdiffusion, sondern bilden eher die Rahmenbedingungen für eine entsprechende Verbreitung der AF, sodass diese aber trotzdem einen starken Einfluss auf die Durchdringung automatisierter Fahrzeuge besitzen. Gemäss der in Kapitel 3.3 ausgewerteten Matrix, sind das die folgenden Treiber:

#### **Sekundärtreiber «Räumliche Regulierung bzw. Zulassung»**

Es ist davon auszugehen, dass die Zulassung von AF nicht gleichzeitig für alle Strassentypen (und Räume) erfolgen wird. Deshalb wird von einer gestaffelten Zulassung je Strassentyp ausgegangen. Dies wird durch mehrere Quellen bestätigt (EBP Schweiz AG und Rapp Trans AG, 2018); (Beiker, 2015) und TP1 des vorliegenden Forschungsprojekts.

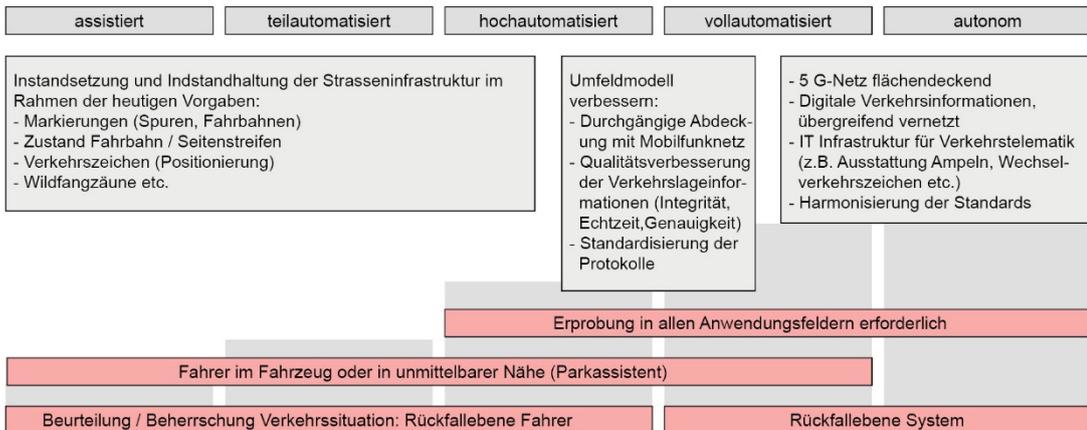
Die (zeitlich gestaffelte) Freigabe der Strassen und Räume wird ausführlich unter dem Kapitel 5 beschrieben und begründet.

Neben der rein technisch operativen Frage der Zulassung ergeben sich auch Fragen aus dem Bereich der Ethik («Wie sicher ist sicher genug?») und politischer Aspekte (z.B. Gerechtigkeitsfragen, Datenschutz). Insbesondere zur Thematik des Datenschutzes befasst sich im Rahmen dieses Forschungsprojekts das TP3 (Daten).

#### **Sekundärtreiber «Ausstattung Strasseninfrastruktur» (Sensorik, Kommunikationseinrichtungen)**

Für den Betrieb sowohl von AF als auch kommunizierenden AF (insb. zu LSA u. dgl.) sind entsprechende Sensoren und Kommunikationseinrichtungen Voraussetzung. Die Ausrüstung der Strassen wird – alleine schon aus finanziellen Gründen – nicht gleichzeitig flächendeckend erfolgen. Je nach Ausrüstungsgrad oder einem «verkehrspolitischen» Entscheid (vgl. Sekundärtreiber «Räumliche Regulierung, bzw. Zulassung») erfolgt somit die Durchdringung von AF für die Strassentypen und Räume gestaffelt.

Hinzu kommt ein in Abhängigkeit des Automatisierungsgrades unterschiedlicher Ausrüstungsgrad der Infrastruktur zum Tragen (vgl. *Abb. 15*).



**Abb. 15** Übersicht benötigte Infrastruktur in Abhängigkeit des Automatisierungsgrades (vbw Die bayerische Wirtschaft, 2016)

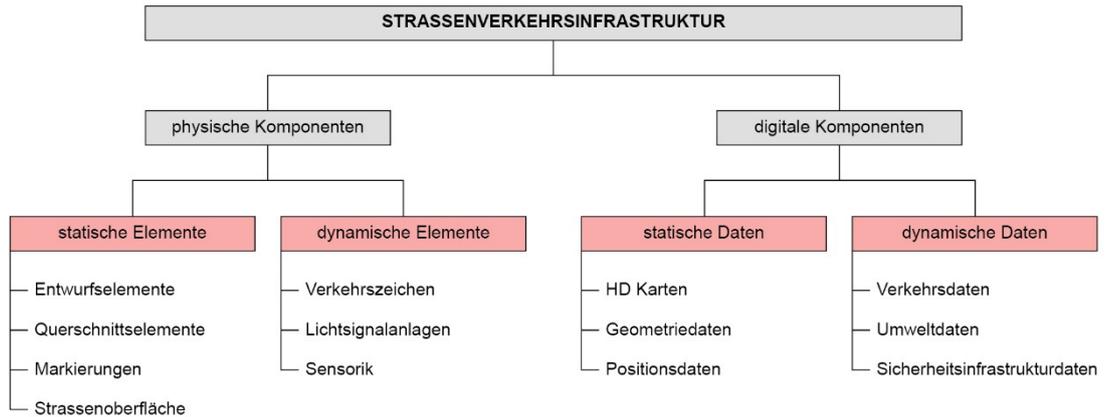
Gemäss der Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft (vbw Die bayerische Wirtschaft, 2016) steigen die Anforderungen an die Infrastruktur, je höher der Automatisierungsgrad sein wird. Für die Stufen 4 und 5 sind folgende Standards eine Voraussetzung:

- gut reflektierende Fahrbahnmarkierungen,
- gut positionierte Verkehrszeichen,
- Ebenheit der Fahrbahnoberfläche,
- möglichst durchgängige Verfügbarkeit von Seitenstreifen (sicherer kurzfristig erreichbarer Halt),
- Ausstattung mit Wildfangzäunen,
- kontrastreiche Spurbegrenzungslinien und Fahrstreifenmarkierungen.

Eine so ausgerüstete Strasseninfrastruktur erleichtert in erster Linie die verlässliche Lesbarkeit durch die fahrerseitige Sensorik, beispielsweise für die Führung des Fahrzeugs in der Fahrstreifenmitte.

Das Center for Transportation Research (Kockelman, 2017) erwähnt bei den infrastrukturellen Anforderungen für automatisiertes Fahren noch zusätzlich eine ausreichende Beleuchtung und beziffert die Infrastrukturkosten als relativ hoch.

Die Strassenverkehrsinfrastruktur lässt sich dabei in physische und digitale Komponenten unterteilen (vgl. *Abb. 16*):



**Abb. 16** Einteilung der Strasseninfrastruktur (Kühn, 2018)

### Sekundärtreiber «Strassennutzbarkeit»

Die Nutzbarkeit des Strassenraums bzw. dessen Ausgestaltung hat einen Einfluss auf die Einsatzmöglichkeiten von AF. In Anbetracht der voraussichtlich über mehrere Jahrzehnte dauernde Durchdringungszeit automatisierter Fahrzeuge ist mit einer langen Dauer eines so genannten Mischbetriebs zu rechnen. Dabei gilt es, den Begriff des Mischbetriebs nach zwei grundsätzlichen Formen zu unterscheiden:

- Automatisierte Fahrzeuge und nicht automatisierte Fahrzeuge
- Automatisierte Fahrzeuge und andere nicht automatisierte Verkehrsteilnehmer

Während der erste Fall langfristig nicht mehr vorhanden sein wird, verbleibt das Mit- bzw. Nebeneinander von automatisierten Fahrzeugen und anderen nicht automatisierten Verkehrsteilnehmern, wie Fussgängern und Velofahrern. Für den vorliegenden Forschungsauftrag wird von einer zeitlichen Periode ausgegangen, in welcher beide Fälle vorkommen werden. Um den Mischverkehr zu vereinfachen, könnten die Flächen der automatisierten Fahrzeuge limitiert oder spezifische Infrastruktur angeboten werden. Insbesondere so genannte Übergabebereiche (Uhr, 2016), an denen der Fahrzeuglenker wieder Fahraufgaben übernehmen muss (bspw. beim Verlassen einer für die AF freigegebenen Autobahn), müssen entsprechend Flächen bereitgestellt werden.

In einem ersten Schritt muss deshalb geklärt werden, wie die Infrastruktur diesbezüglich optimal gestaltet werden kann. So sind grundsätzlich zwei infrastrukturelle Ausprägungen denkbar:

- Strassen mit gemeinsamer Nutzung des Querschnitts
- Strassen mit einer separaten Fläche bzw. einem separaten Fahrstreifen für automatisierte Fahrzeuge

Dabei kann dies eine gestaffelte Zulassung zu Folge haben, wenn zu Beginn gewisse «Auf-lagen» aus Sicherheitsüberlegungen und betrieblichen Gründen gemacht werden.

Beispielhaft:

- AF müssen auf separaten Fahrstreifen fahren → Zulassung nur 3-streifige HLS
- AF nur auf Strassen mit  $V_{\max}$  30 km/h → Zulassung nur auf innerörtlichen (-städtischen) Strassen

Eine solche Zulassung kann (und wird vermutlich) über einen beschränkten Zeitraum erfolgen. Dieser Zeitraum kann wiederum von der technischen Ausrüstung oder der technischen Verfügbarkeit abhängig sein.

### 3.4 Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems im Mischverkehr zwischen automatisierten und konventionellen Fahrzeugen

Die Thematik Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems im Mischverkehr aus automatisierten und konventionellen Fahrzeugen wurde bereits von einigen internationalen Forschern untersucht. Im Folgenden sind nennenswerte – für die im Rahmen des TP5 (Mischverkehr) relevanten – Arbeiten kurz aufgeführt.

Dominković et al. geben einen sehr breiten Überblick zur zukünftigen Entwicklung des autonomen Fahrens und gehen dabei vor allem auf die Umwelt- und Sicherheitsaspekte sowie deren Entwicklung im Zuge der Umstellung auf ein autonomes Fahren ein (Dominković, et al., 2018).

Hedlund beschäftigt sich genauer mit dem Zusammenspiel von autonomen und manuell geführten Fahrzeugen. Er untersucht dabei nicht nur die zukünftige Entwicklung von autonomen Fahrzeugen im Speziellen und des Strassenverkehrs im Allgemeinen, sondern berücksichtigt auch die derzeitige Meinung der Öffentlichkeit und die Gesetzgebung in diesen Belangen. Er kommt zu dem Schluss, dass die amerikanische Regierung in Form des Department of Motor Vehicles und der State Highway Safety Offices vor grossen Herausforderungen stehen und gibt entsprechende Handlungsempfehlungen (Hedlund, 2017).

Litman erwartet, dass autonome Fahrzeuge im Jahr 2030 den manuellen Fahrer sowohl aus sicherheitstechnischer, als auch finanzieller Sicht ablösen können, wobei er auch Gründe nennt, weshalb sich die Entwicklung verzögern könnte. Den Mischverkehr empfindet Litman als einen sehr kritischen Faktor bei der Einführung von autonomen Fahrzeugen, da aus seiner Sicht einige Vorteile erst bei einem sehr grossen Anteil an automatisierten Fahrzeugen am Gesamtverkehrsaufkommen zum Tragen kommen (Litman, 2018).

Das von Trent et al. analysierte Projekt «Drive Me» bewertet die grossvolumige Einführung von autonomen Fahrzeugen in das Strassenverkehrssystem und untersucht die Einflüsse auf Lebensqualität und Nachhaltigkeit im urbanen Bereich. Sie fokussieren sich dabei auf die Auswirkungen des Szenarios in Bezug auf Verkehrssicherheit, Verkehrsfluss und Energieeffizienz (Trent, et al., 2017).

Insbesondere auf dem Gebiet der für das TP5 (Mischverkehr) relevanten Fragestellungen liegen in der Schweiz nur wenige Arbeiten vor. Von Relevanz ist hier eine Publikation der bfu (Uhr, 2016), in welcher erwartet wird, dass insbesondere in einem Mischbetrieb von Fahrzeugen mit einem unterschiedlichen Automatisierungsgrad erhöhte sicherheitsrelevante Herausforderungen bestehen werden (im Fokus stehen dabei insbesondere der Automatisierungsgrad 2 und 3). Die Studie empfiehlt daher unter anderem, einen Schwerpunkt auf die Unfallforschung zu legen. Ebenso sieht die Studie der bfu (Uhr, 2016) Forschungsbedarf bei der Frage der Infrastrukturanpassung. Hier steht die Frage im Raum, ob und in welchem Umfang und insbesondere inwieweit räumlich umsetzbar ggf. eigene Fahrstreifen für automatisierte Fahrzeuge bereitgestellt werden sollen.

In der Schweiz befasst sich die bis dato aktuellste Studie mit dem induzierten Verkehr durch autonome Fahrzeuge (Hörl, et al., 2019) mit einer Abschätzung der Folgen von automatisierten Fahrzeugen auf den Schweizer Strassen. Dabei handelt es sich um eine Studie, deren Analysen in einem Detaillierungsgrad durchgeführt wurden, wie sie – gemäss den Autoren – weltweit die erste ihrer Art ist. Hierbei wurden Kostenstrukturen automatisierter Mobilitätsangebote im Detail beleuchtet. Zur Abschätzung der Verkehrsmittelwahl wurde in der Stadt Zürich eine Stated-Choice Befragung durchgeführt. Abschliessend erfolgten Simulationen mittels MATSim für zwei Szenarien (erstes Szenario mit dem heutigen Verkehrssystem und einer Flotte selbstfahrender Taxis, die auch im Rahmen eines Pooling-Services gebucht oder als Zubringer für Zugverbindungen genutzt werden können. Im zweiten Szenario wird den Mobilitätsteilnehmern die Möglichkeit geboten, selbst automatisierte Fahrzeuge zu erwerben). Die Autoren kommen zum Ergebnis, dass sich die

Kostenstrukturen für Privatfahrzeuge auch in Zukunft kaum ändern werden. Die Abschreibungen werden auch weiterhin den Hauptkostenblock der laufenden Kilometerkosten darstellen. Im Taxibereich wird eine massive Änderung der Kostenstruktur erwartet. Insgesamt kommt die Kostenstudie zum Schluss, dass Mobilität durch den Wegfall von Fahrerlöhnen günstiger angeboten werden kann. Allerdings bleiben die laufenden Kosten für den Privatbesitz konstant. Die Preisänderungen führen zu einer Situation, in der der öffentliche Verkehr (inklusive Taxiangeboten) hochgradig kompetitiv zum MIV werden kann. Gemäss der Studie lässt sich festhalten, «dass es also zu erwarten ist, dass automatisierte Fahrzeuge in verschiedenen Marktsegmenten aus finanzieller Sicht einen erheblichen Vorteil haben werden». Die Studie kommt zum Schluss, dass die Zulassung privater automatisierter Fahrzeuge zu einer starken Mehrbelastung des Verkehrssystems führen könnte und regulatorisch mit Bedacht begleitet werden muss (Hörl, et al., 2019).

## 4 Verfassen der Migrationsszenarien

Innerhalb des TP5 sollen Migrationsszenarien verfasst werden, die verschiedene realistische Pfade aufzeigen, wie sich die Fahrzeugflotte der Schweiz in der Zukunft entwickeln wird. Besonderes Augenmerk soll dabei auf automatisierte Fahrzeuge in unterschiedlichen Nutzungsformen (geteilt oder privat genutzt) gelegt werden. Es sollen Fahrzeugtypen des Individualverkehrs (Personenwagen) sowie des Güterverkehrs (Lastwagen) betrachtet werden. Die Vorhersage wird mittels Szenarien realisiert, da die tatsächliche Entwicklung von verschiedensten Umständen abhängig ist. Im Kapitel 3.3 wurde aufgezeigt, welche Treiber dazu führen, dass automatisierte Fahrzeuge in der Schweiz verfügbar sein werden und genutzt werden können. Bei etlichen Aspekten sind noch grosse Unsicherheiten bzgl. der zukünftigen Entwicklungen vorhanden, insbesondere da sie abhängig von politischen, juristischen oder ökonomischen Entscheidungen sind. Szenarien bieten die Möglichkeit einen Bereich aufzuspannen, in dem die tatsächlichen zukünftigen Werte liegen können.

Dieser Abschnitt erläutert, wie der Bestand der Fahrzeuge der Schweiz mit Hilfe eines Flottenmodells für die Zukunft prädiziert wird. Es wird zunächst allgemein auf die Methodik eingegangen, danach wurden das Modell und die einzelnen für die Berechnung herangezogenen Annahmen detailliert erläutert. Schliesslich werden unterschiedliche Ausprägungen einzelner Annahmen definiert, um Migrationsszenarien zu verfassen.

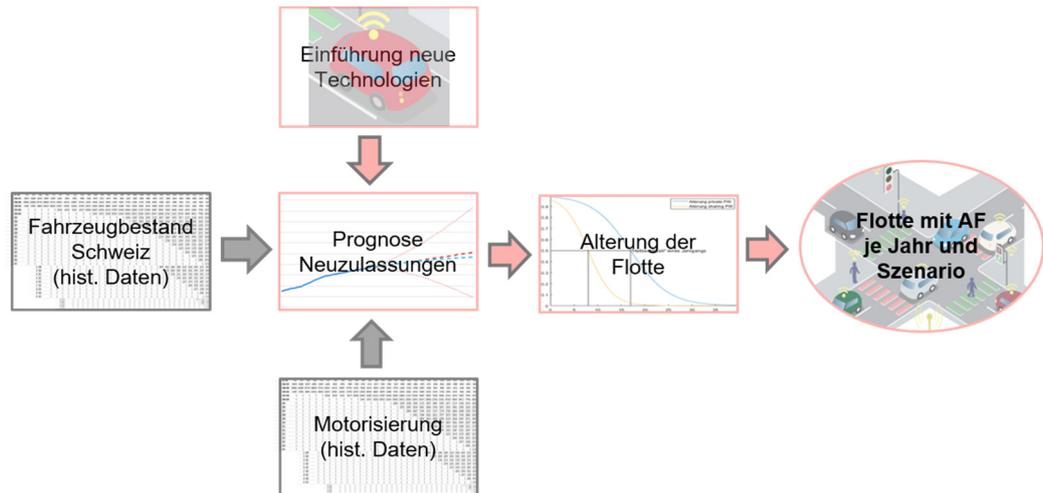
### 4.1 Methodik

Für die Definition von Migrationsszenarien automatisierter Fahrzeuge in der Schweizer Fahrzeugflotte werden historische Daten des Fahrzeugbestandes herangezogen und analysiert. Aus den historischen Daten kann das Fahrzeugkaufverhalten der Schweizer Bevölkerung abgeleitet und prognostiziert werden. Die öffentlich zugänglichen Daten enthalten jährliche Bestandszahlen der Schweizer Fahrzeugflotte nach Jahr der Erstzulassung. Somit ist es möglich, Werte für Neuzulassungen abzulesen sowie die Überlebensdauer eines Fahrzeugjahrgangs zu extrahieren.

In der Bevölkerungsprognose des Bundesamtes für Statistik (BFS, 2017) wird davon ausgegangen, dass die Bevölkerung bis zum Jahr 2045 wachsen wird. In weitergehenden Studien des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE, 2016) wurde auf Basis dieser Bevölkerungsprognose eine Prognose der Mobilitätswerkzeuge der Schweizer Bevölkerung erstellt. Diese Prognosen werden auch dem hier entwickelten Flottenmodell zugrunde gelegt.

Um Aussagen über die Entwicklung der Durchdringung automatisierter Fahrzeuge in der Fahrzeugflotte der Schweiz treffen zu können, müssen einige Annahmen formuliert werden. Hierzu zählt zum einen die Einführung der automatisierten Fahrzeuge selbst, als auch der Anteil, den diese an den jährlichen Neuzulassungen ausmachen. Auch zur Alterung der Fahrzeuge müssen Annahmen getroffen werden, insbesondere, wenn sich die Nutzung der automatisierten Fahrzeuge zu der von konventionellen Fahrzeugen unterscheidet. Hierbei sind insbesondere geteilt genutzte Fahrzeuge zu berücksichtigen.

Um der Unsicherheit in den benötigten Annahmen Rechnung zu tragen, werden mehrere Szenarien definiert und die Durchdringung der automatisierten Fahrzeuge je Szenario mit Hilfe des Flottenmodells berechnet. Im Flottenmodell werden die Neuzulassungen in einem Jahr unterteilt nach Fahrzeugtyp berechnet. Durch die unterstellte Alterung für die einzelnen Fahrzeugtypen können dann die verbliebenen Fahrzeuge eines Jahrgangs für jedes Jahr berechnet werden, aufsummiert ergibt dies den Bestand an Fahrzeugen in der Schweizer Flotte. Das Vorgehen ist in *Abb. 17* dargestellt, die einzelnen Schritte werden in den folgenden Abschnitten genauer erläutert.



**Abb. 17** Methodik des Flottenmodells zur Berechnung des Bestandes konventioneller und automatisierter Fahrzeuge in der Schweizer Fahrzeugflotte

## 4.2 Allgemeine Einflüsse auf die Flottenzusammensetzung

Innerhalb des Modells wird von einer Datengrundlage ausgegangen, die die Vergangenheit widerspiegelt. Vorhersagen in die Zukunft auf solch einer Datenbasis werden immer den Trends der Vergangenheit folgen. Bei neuartigen Technologien, die in der Vergangenheit noch nicht verfügbar waren, können die Trends jedoch auch grundlegend verschieden sein. Ob und in welchem Masse automatisierte Fahrzeuge in der Schweizer Flotte verfügbar sein werden, hängt stark von der Akzeptanz der Bevölkerung aber auch von Massnahmen der Politik sowie dem Angebot der Wirtschaft ab. Sollten politische Massnahmen beispielsweise die Nutzung neuer Technologien vorschreiben oder konventionelle Fahrzeuge verbieten, kann sich die Flotte schlagartig verändern. Um die relevanten Effekte im Flottenmodell berücksichtigen zu können, wurden in Kapitel 3.3 die relevanten Treiber für die Einführung automatisierter Fahrzeuge analysiert und werden somit qualitativ im Flottenmodell berücksichtigt.

Insbesondere die Einstellung der Bevölkerung trägt wesentlich zur Zusammensetzung der Fahrzeugflotte bei. In jüngster Vergangenheit ist beispielsweise zu beobachten, dass Menschen weniger Wert auf den Besitz eines Fahrzeugs legen und verstärkt geteilte Mobilitätsangebote nutzen (Sommer, 2011). Dies kann wesentliche Veränderungen in der Fahrzeugflotte mit sich bringen. Hierauf haben auch Wirtschaft und Politik einen grossen Einfluss. Die Schaffung eines entsprechenden Angebotes oder Regulierung beispielsweise sind Voraussetzungen, die gewisse Entscheidungen bewirken können. Wie bereits in der Treiberanalyse im Kapitel 3.3 erwähnt, sind jedoch auch andere Einflussfaktoren, besonders die genannten Primärtreiber, von hoher Relevanz.

## 4.3 Flottenmodell

Dieser Abschnitt erläutert die im Flottenmodell verwendeten Annahmen. Zunächst wird auf die Entwicklung der Schweizer Bevölkerung und der damit einhergehenden Veränderung des Bestandes an Fahrzeugen eingegangen. Darauf folgt die Beschreibung der Annahmen zu den Neuzulassungen von Personen- und Güterverkehrsfahrzeugen und deren Alterung. Schliesslich werden die Annahmen zur Einführung der Automatisierung beschrieben.

### 4.3.1 Randbedingungen des Modells

Innerhalb des Flottenmodells soll die Entwicklung der Schweizer Fahrzeugflotte vorhergesagt werden. Da solch eine Vorhersage viele Unsicherheiten mit sich bringt, werden einige Einschränkungen gemacht. Die Fahrzeugtypen, die im Modell betrachtet werden, sind Personenkraftwagen und Güterverkehrsfahrzeuge. Die Personenkraftwagen werden auch in den Statistiken des Bundesamtes für Statistik in der Fahrzeuggruppe 1 zusammengefasst. Die Güterverkehrsfahrzeuge entsprechen der Fahrzeuggruppe 3 des Bundesamtes für Statistik und setzen sich aus den Fahrzeugtypen Lieferwagen, Lastwagen, Sattelmotorfahrzeug und Sattelschlepper zusammen. Es wird hier keine weitere Unterscheidung vorgenommen. Was die Annahmen bezüglich Alterung, Einführung der Automatisierung etc. angeht, werden alle Fahrzeuge in diesen Gruppen aggregiert betrachtet. Des Weiteren werden für zukünftige Szenarien automatisierte, geteilt genutzte Fahrzeuge betrachtet. Diese sog. Sharing-Fahrzeuge entsprechen einer Angebotsform, wie den in TP4 definierten YourCar, ShareTonomy oder auch CityTaxi, also allen Formen automatisierter Fahrzeuge, die nicht im Privatbesitz sind, sondern von verschiedenen Personen genutzt werden können. Ob die Nutzung allein oder gepoolt stattfindet, wird hier ebenfalls nicht unterschieden. Von einer Unterscheidung zwischen diesen Angebotsformen wird ebenfalls abgesehen, da es hierfür nicht ausreichend Datengrundlage gibt. Die automatisierten Fahrzeuge im Privatbesitz, die im Flottenmodell erwähnt werden, entsprechen der Angebotsform MyCar des TP4 und die Güterfahrzeuge umfassen SmartTruck, SmartLoader oder anderen Güterverkehrsfahrzeugen des Strassenverkehrs.

Die Fahrzeugflotte eines Landes umfasst alle in diesem Land zugelassenen Fahrzeuge. Über den Bestand der Fahrzeuge sind Daten der öffentlichen Ämter verfügbar, so können Neuzulassungen, Alter etc. einer Flotte analysiert werden. Insbesondere in zentral gelegenen Ländern wie der Schweiz wird die Infrastruktur jedoch nicht nur durch die einheimische Fahrzeugflotte, sondern auch durch den Transitverkehr genutzt. Um jedoch die Menge an Fahrzeugen zu berücksichtigen, die tatsächlich in der Schweiz fährt, sind weitere Daten (beispielsweise aus Beobachtungen der Strassen) nötig. Innerhalb dieses Projektes wird jedoch darauf verzichtet. Die Ergebnisse gelten jeweils nur für die inländische Flotte.

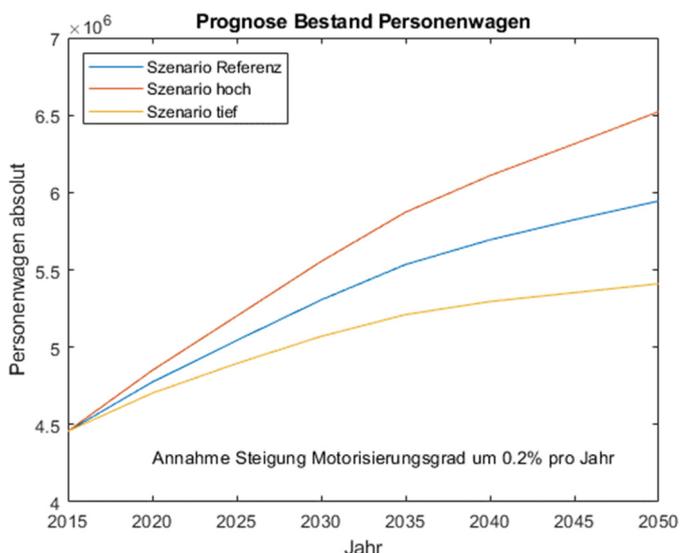
Im Flottenmodell, welches insbesondere der Frage nachgehen soll, wie gross die Durchdringung automatisierter Fahrzeuge zu bestimmten Zeitpunkten in der Zukunft sein wird, sind besonders die Neuzulassungen von Fahrzeugen von Interesse. Es wird davon ausgegangen, dass neue Technologien bei diesen Fahrzeugen eingeführt werden. Im Laufe der Zeit, die dieses Fahrzeug in der Flotte besteht, kann dann beispielsweise ein Fahrzeug, welches zur Neuzulassung ein konventionelles Fahrzeug war, nicht mehr zu einem automatisierten Fahrzeug werden. Das bedeutet, dass beispielsweise das Remote-Update von Funktionen, wie dem automatisierten Fahren, was zukünftig möglich sein kann, hier nicht berücksichtigt wird.

Innerhalb des Projektes sind Betrachtungen von Zeitschritten in vollen 10-Jahres Zeitschritten bis zum Horizont 2050 von Interesse. Die Ergebnisse des Flottenmodells werden für jedes Jahr berechnet und für die Zeitschritten 2030, 2040 und 2050 ausgewertet. Da für das Jahr 2020 noch nicht vorhersehbar ist, dass automatisierte Fahrzeuge in der Schweizer Fahrzeugflotte vorhanden sein werden, handelt es sich bei diesem Jahr nur um eine Fortschreibung der aktuellen Entwicklungen. Einige Annahmen, wie beispielsweise die Einführung des automatisierten Fahrens, werden für konkrete Jahre getroffen. Solch konkrete Annahmen sind für das Flottenmodell vonnöten, da daraus Zahlen für die Flottenzusammensetzung errechnet werden. Die Zahlenwerte sind immer Annahmen, die auf Expertenschätzungen und Literatur basieren. Um die Effekte der unterschiedlichen Annahmen zu zeigen, werden verschiedene Szenarien formuliert.

### 4.3.2 Bevölkerungsentwicklung, Motorisierung und Güterverkehrsleistung

In Studien des Bundesamtes für Statistik der Schweiz wird prognostiziert, dass die Schweizer Bevölkerung wachsen wird (BFS, 2017). Es wurden drei Szenarien für das Wachstum der Bevölkerung erstellt, wobei eines der Fortschreibung der historischen Trends entspricht und Referenzszenario genannt wird, die anderen beiden stellen eine Variante mit geringerem Wachstum und eine mit stärkerem Wachstum dar. Die Zahlen des mittleren, sog. Referenzszenarios, werden verwendet, um die Zahl der Einwohner der Schweiz in den Jahren 2019 bis 2045 zu prognostizieren. Auf die übrigen Jahre bis 2050 wird durch lineare Extrapolation geschlossen. In der Prognose wird davon ausgegangen, dass bisherige Trends fortgeführt werden. Wie jedoch bereits in Kapitel 3.3 ausgeführt, gibt es verschiedenste Treiber, wie beispielsweise das Umweltbewusstsein der Bevölkerung oder die Entwicklung des ÖV, die auch Entwicklungen in eine andere Richtung fördern können.

Die Studien des Bundesamtes für Raumentwicklung der Schweiz gehen ebenfalls vom Referenzszenario für die Bevölkerung der Schweiz aus und entwickeln so Perspektiven für den Personen- und Güterverkehr der Zukunft (ARE, 2016). Auch hier werden Sensitivitäten der Annahmen berücksichtigt und verschiedene Trends modelliert. Ein Szenario ist ebenfalls die Fortschreibung des aktuell zu beobachtenden Trends. Hierbei wird vorausgesagt, dass der Motorisierungsgrad der Schweizer in den Jahren bis 2040 um 0.2 % pro Jahr steigt (ARE, 2016). Mit dieser Annahme und der prognostizierten Bevölkerungszahl ergibt sich eine erste Abschätzung zur Gesamtflotte. Bis 2050 wird das gleiche Wachstum angenommen. Diese Schätzung ergibt einen Startwert, um die Neuzulassungen zu schätzen. Die tatsächliche Flottengrösse ergibt sich dann zusammen mit den anderen Annahmen auf Basis der Alterung der Flotte und der Neuzulassungen.

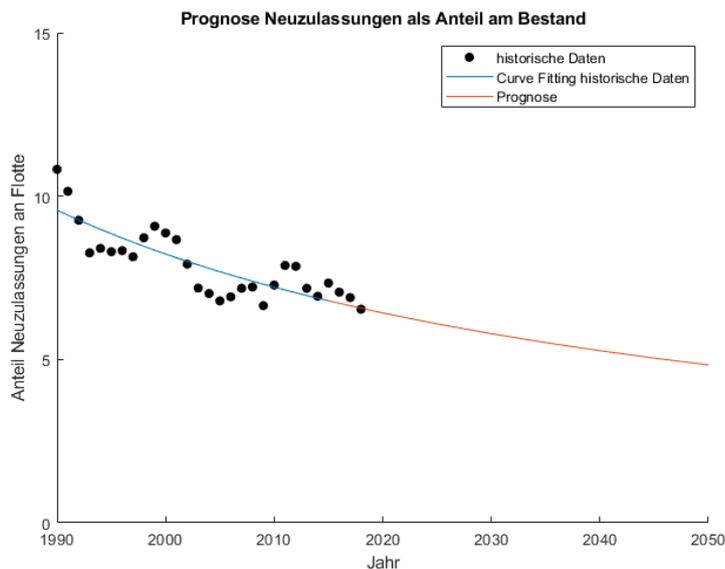


**Abb. 18** Prognose des Bestands von Personenwagen der Schweizer Flotte nach den Bevölkerungsszenarien des Bundesamtes für Statistik und der Prognose der Steigerung der Motorisierung, extrapoliert bis zum Jahr 2050

Für die Entwicklung des Güterverkehrs wird ebenfalls von den Studien des Bundesamtes für Raumentwicklung ausgegangen. Hierbei wird für das Referenzszenario prognostiziert, dass die Güterverkehrsleistung in der Schweiz auf dem Verkehrsträger Strasse in den Jahren 2010 bis 2040 um etwa 0,9 % pro Jahr steigen wird (ARE, 2016). Im Flottenmodell für den Güterverkehr wird diese Annahme übernommen und davon ausgegangen, dass sich auch die Fahrzeugflotte proportional dazu entwickelt d.h., dass die Gefässgrössen im Mittel gleich gross bleiben. Auf die übrigen Jahre bis 2050 wird durch lineare Extrapolation geschlossen. Diese Schätzung ergibt einen Startwert, um die Neuzulassungen zu schätzen. Auch im Güterverkehr ergibt sich die tatsächliche Flottengrösse zusammen mit den anderen Annahmen auf Basis der Alterung der Flotte und der Neuzulassungen.

### 4.3.3 Annahmen zu zukünftigen Neuzulassungen

Auf Basis der historischen Daten des Fahrzeugbestandes der Schweiz ergibt sich der Trend, dass der Anteil neu zugelassener Fahrzeuge an der Flotte sinkt. Um die Entwicklung der Neuzulassungen zu prognostizieren, werden Funktionen an die historischen Daten angepasst und diese extrapoliert. In einigen Studien wird prognostiziert, dass die Anzahl der Neuzulassungen in den Jahren bis 2024 stagnieren wird (BAK Economics AG, 2018). In den letzten vier Jahren ist die absolute Zahl der neuen Inverkehrsetzungen sogar gesunken (BFS, 2019). Im Flottenmodell wird die Zahl der Neuzulassungen als Anteil am prognostizierten Bestand nach den zuvor erwähnten Annahmen berechnet, dieser Anteil sinkt bis zum Prognosehorizont 2050, was auch die Annahme einer älter werdenden Flotte aus (Auto Schweiz, 2016) bestätigt. Es wird eine rationale Funktion an die historischen Daten angepasst, die den sinkenden Anteil an der Flotte darstellt und abgeflacht fortführt. In *Abb. 19* ist dies beispielhaft für den Anteil an Neuzulassungen an der Flotte über die Jahre 1990 bis 2050 dargestellt, die Funktion wird je nach betrachtetem Szenario angepasst.



**Abb. 19** Prognose der Neuzulassungen als Anteil an der prognostizierten Flotte bis zum Prognosehorizont 2050 durch Annäherung an eine Funktion und Parameterschätzung

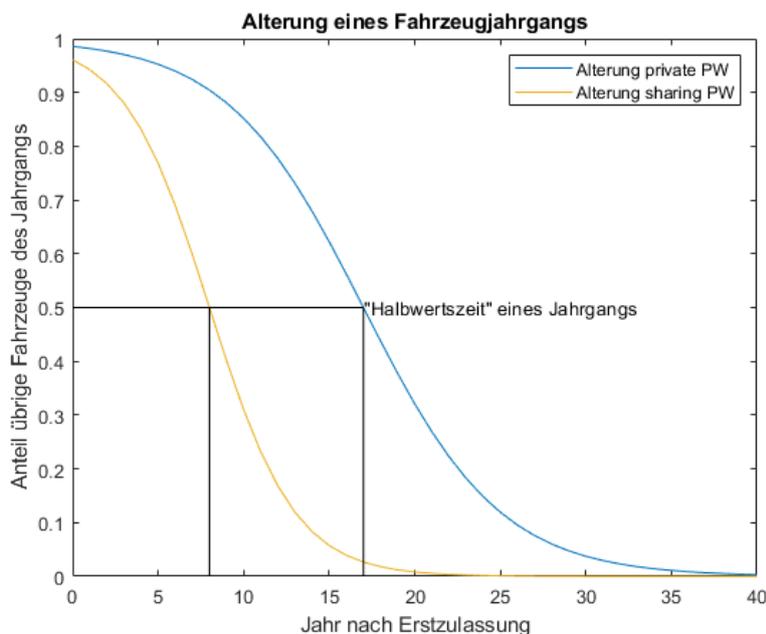
Im Gegensatz zum Personenverkehr ergibt sich auf Basis der historischen Daten des Fahrzeugbestandes der Schweiz der Trend, dass der Anteil neu zugelassener Fahrzeuge an der Flotte der Güterfahrzeuge steigt (BFS, 2019). Auch dieser Trend soll im Flottenmodell durch einen graduellen Anstieg mit Hilfe einer entsprechenden Funktion, die in den Szenarien festgelegt wird, fortgeschrieben werden.

Die Neuzulassungen in den neuen Angebotsformen des automatisierten Fahrens werden je nach Szenario geschätzt. Sie sind jeweils ein Teil der gesamten Neuzulassungen im entsprechenden Jahr ab der Einführung des Angebotes. Zu beachten ist, dass dies Schätzungen sind, die aktuelle Trends fortschreiben bzw. für die jeweiligen Szenarien anpassen. Effekte, die durch Eingriffe wie staatliche Subventionen (vgl. Kapitel 3.3) zusätzlich entstehen, werden hier nicht betrachtet, da dies zu Sprüngen im Funktionsverlauf führen kann, die aktuell nicht vorhersehbar sind.

#### 4.3.4 Fahrzeugalterung

Nachdem die Neuzulassungen in einem Jahr definiert sind, wird innerhalb des Flottenmodells berechnet, wie viele Fahrzeuge jeweils aus dem Fahrzeugjahrgang in der Flotte verbleiben. Eine Analyse der historischen Daten ergibt, dass in den ersten Jahren, die auf die Erstzulassung folgen, die Flotte zunächst steigt (BFS, 2019). Das könnte dadurch erklärt werden, dass Fahrzeuge mit geringem Alter aus dem Ausland in die Schweiz importiert werden und dort neu zugelassen werden. Diese Fahrzeuge kommen also erst im zweiten bis vierten Jahr zu den Fahrzeugen des Jahrgangs hinzu. Ab etwa dem dritten Jahr nach der Erstzulassung sinkt die Anzahl der Fahrzeuge eines Jahrganges kontinuierlich. Diese Abnahme ist zunächst nur gering, erfolgt dann verstärkt bis kaum Fahrzeuge eines Jahrgangs mehr im Bestand sind. Einige wenige Fahrzeuge verbleiben auch nach vielen Jahren weiterhin im Bestand. Solche Fahrzeuge, wie die heutigen Oldtimer, wird es vermutlich auch in Zukunft weiterhin geben.

Im Flottenmodell wird diese Entwicklung der Fahrzeugalterung durch eine logistische Funktion beschrieben. Der zu Beginn auftretende Anstieg durch Importe wird hierbei nicht modelliert. Diese Fahrzeuge werden bereits zu Beginn den Neuzulassungen hinzugefügt und die Abnahme entsprechend angepasst. Die Parameter der Funktion sind zum einen der Punkt der Funktion, an der noch 50 % der Fahrzeuge eines Jahrgangs im Bestand sind und zum anderen ein Parameter zum Anstieg der Funktion im Übergang zwischen den 100 % der Neuzulassungen und der vollständigen Ausserbetriebnahme der Fahrzeuge des Jahrgangs aus der Flotte. Die Abb. 20 beinhaltet zwei Alterungsfunktionen für unterschiedliche Angebotsformen. In blau dargestellt sind Personenwagen, die privat genutzt werden und deren Funktion die Parameter verwendet, die aus den historischen Daten des Fahrzeugbestands abgeleitet wurden. In gelb sind die sog. Sharing-Fahrzeuge, die geteilt genutzt werden, dargestellt. Hierbei wird angenommen, dass die Fahrzeuge, da sie öffentlich angeboten werden und daher häufiger verwendet werden als private Personenwagen, schneller aus der Fahrzeugflotte verschwinden. Diese Annahme bezieht sich unter anderem auf den Primärtreiber «Nutzungsform» aus der Treiberanalyse von Kapitel 3.3. Die Parameter der Funktion, Anstieg und 50 %-Wert wurden entsprechend dieser Annahmen geschätzt.

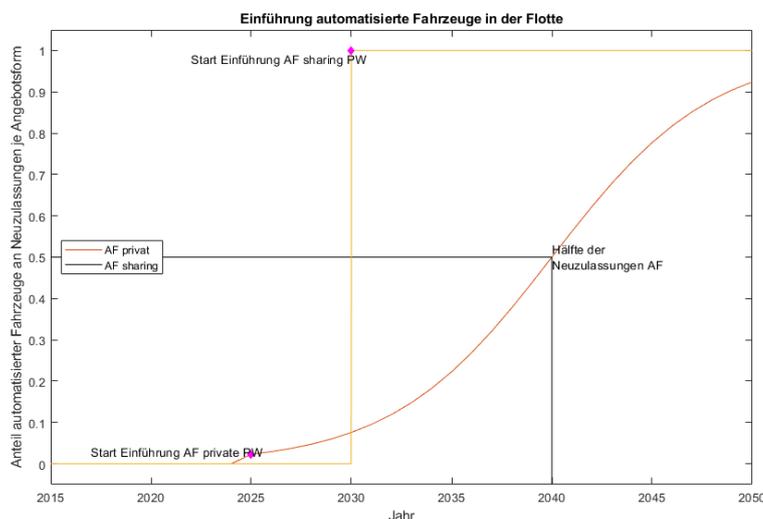


**Abb. 20** Alterung eines Fahrzeugjahrgangs von privat und geteilt genutzten (Sharing) Fahrzeugen

### 4.3.5 Einführung des automatisierten Fahrens

Ein zentrale Funktion des Flottenmodells ist es zu untersuchen, wie automatisierte Fahrzeuge die Flotte der Schweizer Fahrzeuge durchdringen. Hierfür müssen Annahmen zur Einführung dieser Fahrzeuge formuliert werden, welche durch die Treiberanalyse in Kapitel 3.3. über die Primärtreiber «Technische Verfügbarkeit» und «Investitionskosten» und den Sekundärtreiber «Räumliche Regulierung bzw. Zulassung» unterstützt wurden. Zunächst ist eine Annahme über den Einführungszeitpunkt der automatisierten Fahrzeuge von Bedeutung. Aus der Literaturrecherche (vgl. Kapitel 3) wird geschlossen, dass eine Einführung von automatisiertem Fahren Level 4/5 nicht vor dem Jahr 2025 denkbar ist. Dieses Jahr wird für den Start der Einführung automatisierter Fahrzeuge im Privatbesitz angenommen. Für geteilt genutzte Fahrzeuge wird hingegen davon ausgegangen, dass der Start etwas später erfolgen kann, da es hier bereits ein funktionales Netz, auf dem die Fahrzeuge fahren dürfen, geben muss. Des Weiteren ist aus den Untersuchungen des TP2 dieses Projektes abzuleiten, dass geteilt genutzte Fahrzeuge im städtischen Gebiet angeboten werden. Dies kann also erst dann der Fall sein, wenn diese auch im städtischen Gebiet zugelassen sind. Weitere Ausführungen zur Zulassung automatisierter Fahrzeuge auf den Strassen werden in Kapitel 5 dargestellt. Für geteilt genutzte automatisierte Fahrzeuge wird demnach als Startjahr der Zulassung das Jahr 2030 angenommen.

Im Flottenmodell werden geteilt genutzte Fahrzeuge betrachtet, die einer neuartigen Angebotsform entsprechen und ohne einen Fahrer auskommen. Es wird hierbei also nicht von historischen Daten zu geteilt genutzten Fahrzeugen ausgegangen und in die Zukunft extrapoliert, sondern eine neue Form der Mobilität betrachtet. Daher sind diese Fahrzeuge von Beginn an automatisiert, konventionelle Sharing-Fahrzeuge werden über die konventionellen Personenwagen mit abgebildet. Für die automatisierten, geteilt genutzten Fahrzeuge kann also eine stufenförmige Funktion verwendet werden, bei der ab Einführungsjahr 100 % der prognostizierten Neuzulassungen dieses Typs automatisiert sind. Für die privat genutzten Fahrzeuge bietet sich wiederum ein Funktionsverlauf an, der zunächst nur leicht steigt, der Anstieg im Verlauf der Zeit steiler wird aber auch bis zum Prognosehorizont noch nicht 100 % der Neuzulassungen erreicht. Im Bereich zwischen 50 % und 100 % nimmt die Steigung wieder ab, diese Annahmen sind konform mit dem in Studien untersuchten Verhalten zur Anwendung neuer Technologien, wie im Kapitel 3 erwähnt. Die Parameter der Funktion geben wiederum an, wann die Hälfte der Neuzulassungen aus automatisierten Fahrzeugen besteht und wie steil die Funktion verläuft. *Abb. 21* enthält den gewählten Verlauf als Anteil der Neuzulassungen für die Angebotsformen der privat genutzten und der geteilt genutzten Personenwagen. Effekte, die sich daraus ergeben, dass einzelne Gebiete oder Strassentypen nach und nach für die Verwendung von automatisierten Fahrzeugen freigegeben werden, werden in diesem Modell nicht explizit berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass keine sprunghaften Anstiege der Neuzulassungen ausgelöst werden, sondern eher ähnliche Kaufgewohnheiten wie in der Vergangenheit zu beobachten sein werden.



**Abb. 21** Verlauf der Einführung automatisierter Fahrzeuge als Anteil an Neuzulassungen in der Schweizer Fahrzeugflotte

## 4.4 Szenarien Personenwagen

Um die Fahrzeugflotte der Zukunft zu prognostizieren, sind etliche Annahmen zu formulieren. Die Ergebnisse der Prognose sind direkt abhängig von diesen Annahmen und beinhalten grosse Unsicherheiten. Aus diesem Grund werden Szenarien definiert, die die möglichen Ausprägungen der einzelnen Parameter darstellen und so einen Bereich aufspannen, in dem die Zahlen für die tatsächliche Durchdringung automatisierten Fahrens in der Schweizer Fahrzeugflotte liegen werden. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Annahmen für vier unterschiedliche Szenarien und beinhalten die Ergebnisse aus dem Flottenmodell. Es wird unterschieden zwischen dem Trendszenario und dem Pro Sharing-Szenario. Während das Trendszenario weiterstehend die Entwicklungen aus der Vergangenheit fortschreibt, wird im Pro Sharing-Szenario angenommen, dass sich das Mobilitätsverhalten der Schweizer dahingehend verändern wird, dass vermehrt geteilt genutzte Fahrzeuge verwendet werden und sich weniger Fahrzeuge in privatem Besitz befinden, da solche zugunsten der Sharing-Fahrzeuge vermehrt abgeschafft werden. Zu jedem dieser beiden Szenarien gibt es jeweils ein Extremszenario, bei dem höhere Werte für die Zulassung automatisierter Fahrzeuge angenommen werden. Die folgende Abb. 22 zeigt schematisch auf, welche Szenarien innerhalb des TP5 formuliert werden und welche Änderungen in den Annahmen dabei von besonderer Bedeutung sind. Für den Güterverkehr gibt es ebenfalls ein Trendszenario und ein Extremszenario, das Sharing spielt beim Güterverkehr keine Rolle.



**Abb. 22** Übersicht der Ausprägungen auf Basis der Einflussgrössen Ersatzfaktor und Sharing-Fahrzeuge

Hiermit wird die Sensitivität der Parameter auf den gesamten Bestand der automatisierten Fahrzeuge in der zukünftigen Schweizer Fahrzeugflotte getestet. Die Ergebnisse stellen also eher einen Extremfall als einen wahrscheinlichen Zustand dar. Zu beachten ist jedoch, dass in den Szenarien abrupte Änderungen, wie beispielsweise ein Verbot bestimmter Fahrzeugtypen, nicht betrachtet werden. Durch solche Massnahmen wäre es denkbar, dass sich die Flottenzusammensetzung auch extremer ändern kann. Änderungen diesbezüglich sind jedoch zum jetzigen Zeitpunkt nicht absehbar und können so auch nicht plausibel in den Annahmen betrachtet werden.

#### 4.4.1 Trendszenario Personenverkehr

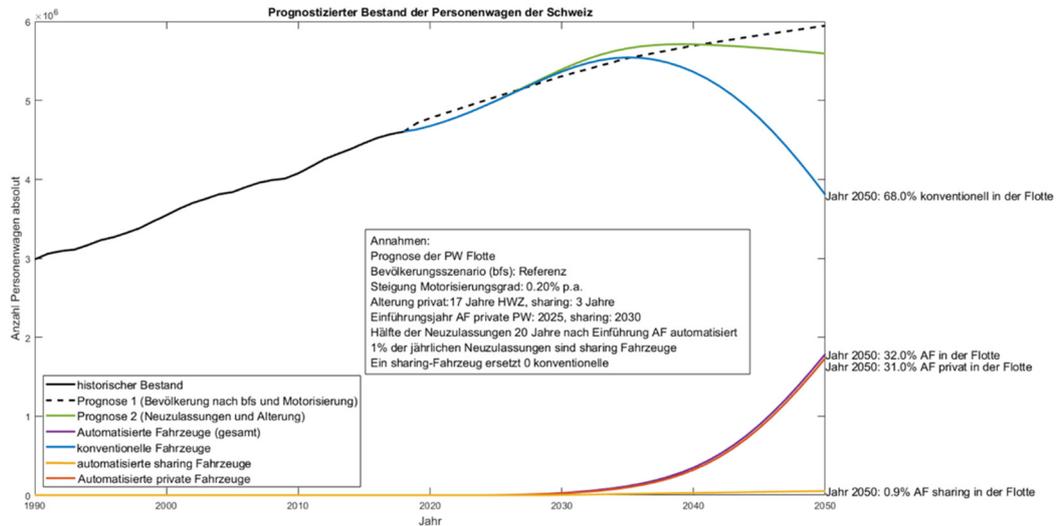
Das Trendszenario soll eine Flotte abbilden, die den Trends der historischen Entwicklung der Schweizer Fahrzeugflotte entspricht.

Neuzulassungen: Auf Basis der historischen Daten des Fahrzeugbestandes der Schweiz ergibt sich der Trend, dass der Anteil neu zugelassener Fahrzeuge an der Flotte sinkt. Dieser Trend wird für das Trendszenario fortgeschrieben. Es wird von der prognostizierten Flottengrösse ausgegangen und für das Jahr 2020 ein Anteil von 6.4 % davon als Neuzulassungen angenommen. Dieser Anteil sinkt graduell bis auf einen Anteil von 4.8 % im Jahr 2050. Von der Gesamtheit der Neuzulassungen entspricht ab dem Jahr der Einführung von automatisierten Sharing-Fahrzeugen ein gewisser Anteil diesem Typ. Im Trendszenario sind das 1 % pro Jahr.

Alterung: Für die Prognose der Alterung der Fahrzeugflotte werden die historischen Daten extrapoliert. Die Alterung der Fahrzeuge kann durch eine logistische Funktion angenähert werden. Damit kann für zukünftige Fahrzeugjahrgänge ermittelt werden, wie gross der Anteil ist, welcher zu einem definierten Zeitpunkt nach der Erstzulassung noch in der Fahrzeugflotte vorhanden ist. Der Anteil liegt also im Jahr der Neuzulassung bei 100 % und sinkt, bis er 0 % erreicht. Parameter sind hierbei der Übergangsbereich, der variiert werden kann, sowie die Jahreszahl, nach der 50 % der Fahrzeuge des Jahrgangs aus der Flotte verschwunden sind. Für private Personenwagen liegt dieser Wert bei 17 Jahren. Für Sharing-Fahrzeuge liegt der 50 %-Wert bei 3 Jahren und der Übergangsbereich ist deutlich steiler als bei privaten Fahrzeugen. Sharing-Fahrzeuge werden, wenn sie zu alt werden und dadurch aus der Flotte verschwinden würden, im folgenden Jahr neu zugelassen. Daraus folgt, dass sich der Wert der Neuzulassungen im Vergleich zur vorher beschriebenen Schätzung noch einmal ändert. In diesem Szenario wird nicht berücksichtigt, dass die Einführung einer neuen Schlüsseltechnologie, wie das automatisierte Fahren, zu einer Beschleunigung des Fahrzeugersatzes führen kann.

Automatisierung: Für die Automatisierung der Personenwagenflotte wird davon ausgegangen, dass erste automatisierte Fahrfunktionen des Levels 4 für private und Sharing-Fahrzeuge im Jahr 2025 bzw. 2030 verfügbar sein werden. Für private Fahrzeuge wird auch für die Prognose der Durchdringung der neuen Technologie in der Fahrzeugflotte ein logistischer Funktionsverlauf angenommen. Hiermit wird ermittelt, wie gross der Anteil automatisierter Fahrzeuge an der Gesamtzahl der neu zugelassenen privaten Fahrzeuge in einem Jahr ist. Dieser Wert steigt entsprechend von 0 % auf 100 %. Die 50 %-Marke wird hier 20 Jahre nach Einführung, also im Jahr 2045 erreicht. Da für diese Studie nur Sharing-Fahrzeuge von Interesse sind, die dem Level der Automatisierung 4 oder höher entsprechen, wird für diesen Anteil der Flotte davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge automatisiert sind.

Die folgende *Abb. 23* enthält die prognostizierte Anzahl der Fahrzeuge verschiedenen Typs über die Jahre bis zum Prädiktionshorizont 2050.



**Abb. 23** Prognostizierter Bestand der Personenwagen der Schweiz nach den Annahmen des Flottenmodells im Trendszenario bis 2050

In Tab. 6 finden sich zur Abb. 23 die entsprechenden Werte des Gesamtbestandes an Fahrzeugen sowie der automatisierten Fahrzeuge, jeweils aufgeteilt nach privaten und geteilt genutzten Fahrzeugen für die Zeitschritte 2030, 2040 und 2050.

**Tab. 6** Errechnete Werte für den Bestand der Personenwagen der Schweizer Flotte nach den Annahmen des Flottenmodells im Trendszenario bis 2050

Jahr	2030	2040	2050
Anzahl PW gesamt	5'391'441	5'708'928	5'591'856
Anzahl PW privat	5'388'370	5'680'416	5'539'399
davon automatisiert	24'575 (0.5 %)	320'837 (5.6 %)	1'735'052 (31.0 %)
Anzahl Sharing-PW	3'071 (0.1 %)	28'512 (0.5 %)	52'457 (0.9 %)
Anteil AF gesamt	0.5 %	6.1 %	32.0 %

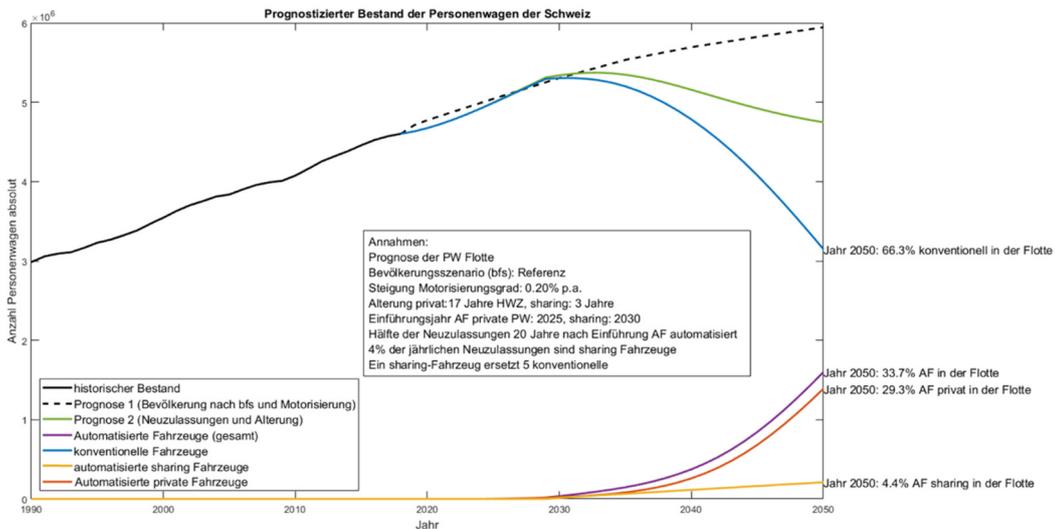
#### 4.4.2 Pro Sharing-Szenario Personenverkehr

Das Pro Sharing-Szenario soll eine Flotte abbilden, die grob den Trends der historischen Entwicklung der Schweizer Fahrzeugflotte entspricht, sich jedoch dahingehend wandelt, dass in der zukünftigen Flotte mehr Fahrzeuge geteilt genutzt werden.

**Neuzulassungen:** Der Trend des sinkenden Anteils neu zugelassener Fahrzeuge in der Flotte wird auch für das Pro Sharing-Szenario fortgeschrieben. Es wird von der prognostizierten Flottengrösse ausgegangen und für das Jahr 2020 ein Anteil von 6.4 % davon als Neuzulassungen angenommen. Dieser Anteil sinkt graduell bis auf einen Anteil von 4.8 % im Jahr 2050. Von der Gesamtheit der Neuzulassungen entspricht ab dem Jahr der Einführung von automatisierten Sharing-Fahrzeugen ein gewisser Anteil diesem Typ. Im Trendszenario sind das 4 % pro Jahr. Bei der Alterung und der Automatisierung der Fahrzeuge ändert sich im Pro Sharing-Szenario im Vergleich zum Trendszenario nichts. Es werden die gleichen Funktionen zur Bestimmung des Alterungsprozesses und zur Einführung automatisierter Fahrzeuge zugrunde gelegt.

**Besonderheiten:** Für das Pro Sharing-Szenario wird davon ausgegangen, dass die Einführung von Sharing-Fahrzeugen bewirkt, dass einige private Fahrzeuge nicht neu zugelassen werden. In diesem Szenario ersetzt ein Sharing-Fahrzeug fünf konventionelle private Fahrzeuge. Das gilt nicht für Sharing-Fahrzeuge, die neu zugelassen werden, weil sie im Vorjahr auf Grund des Alters aus der Flotte verschwunden sind.

Die folgende *Abb. 24* enthält die prognostizierte Anzahl der der Fahrzeuge verschiedenen Typs über die Jahre bis zum Prädiktionshorizont 2050 für das Pro Sharing-Szenario.



**Abb. 24** Prognostizierter Bestand der Personenwagen der Schweiz nach den Annahmen des Flottenmodells im Pro Sharing-Szenario bis 2050

In *Tab. 7* finden sich zur *Abb. 24* die entsprechenden Werte des Gesamtbestandes an Fahrzeugen sowie der automatisierten Fahrzeuge, jeweils aufgeteilt nach privaten und geteilt genutzten Fahrzeugen für die Zeitschritte 2030, 2040 und 2050.

**Tab. 7** Errechnete Werte für den Bestand der Personenwagen der Schweizer Flotte nach den Annahmen des Flottenmodells im Pro Sharing-Szenario bis 2050

Jahr	2030	2040	2050
Anzahl PW gesamt	5'339'234	5'156'758	4'747'167
Anzahl PW privat	5'326'950	5'042'707	4'537'336
davon automatisiert	23'164 (0.4 %)	259'505 (5.0 %)	1'388'924 (29.3 %)
Anzahl Sharing-PW	12'284 (0.2 %)	114'051 (2.2 %)	209'831 (4.4 %)
Anteil AF gesamt	0.7 %	7.2%	33.7%

#### 4.4.3 Extremszenario Pro Sharing Personenverkehr

Es ist vorgesehen, ein weiteres Szenario zu betrachten, welches einen Extremfall im Hinblick auf die Automatisierung von Fahrzeugen darstellen soll. Hierfür werden einige Annahmen dahingehend abgewandelt, dass sich ein grösserer Anteil automatisierter Fahrzeuge in der Flotte ergibt.

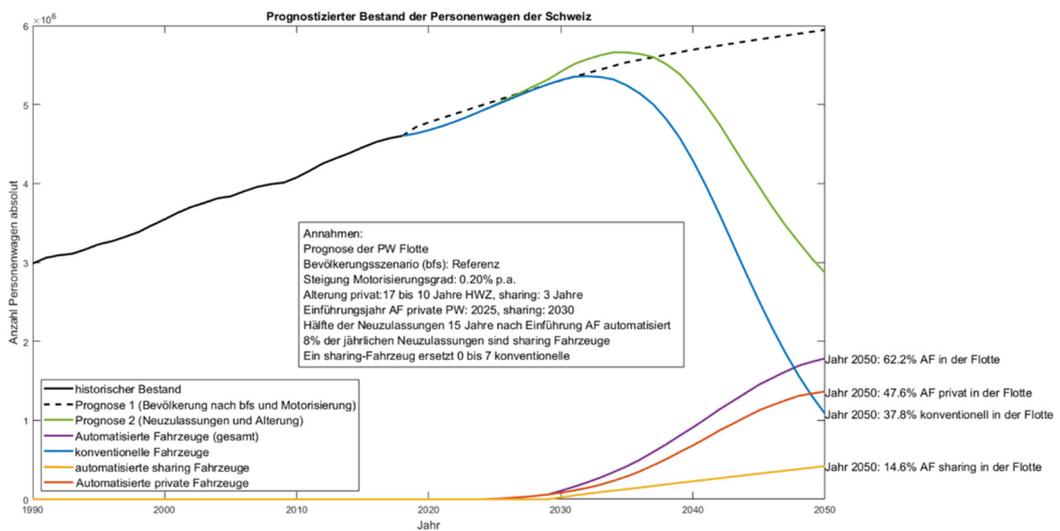
Neuzulassungen: Im Extremszenario Pro Sharing sind 8 % der Neuzulassungen pro Jahr automatisierte Sharing-Fahrzeuge.

Alterung: Durch die Einführung der neuen Schlüsseltechnologie ändert sich die Alterung der privaten Personenwagen über die Zeit, sodass zu Beginn nach 17 Jahren die Hälfte der Fahrzeuge aus einem Jahrgang aus der Flotte verschwunden ist und nachdem die Sharing-Fahrzeuge eingeführt werden, sich diese Zeit auf 10 Jahre verringert. Für Sharing-Fahrzeuge liegt der 50 %-Wert weiterhin bei 3 Jahren und der Übergangsbereich ist deutlich steiler als bei privaten Fahrzeugen. Sharing-Fahrzeuge werden, wenn sie zu alt werden und dadurch aus der Flotte verschwinden würden, im folgenden Jahr neu zugelassen. Dies ergibt, dass sich der Wert der Neuzulassungen im Vergleich zur vorher beschriebenen Schätzung noch einmal ändert.

**Automatisierung:** Die 50 %-Marke, die beschreibt, wann die Hälfte der Neuzulassungen von Privatfahrzeugen automatisiert sein werden, wird in diesem Szenario bereits 15 Jahre nach Einführung, also im Jahr 2040 erreicht.

**Besonderheiten:** Für dieses Szenario wird davon ausgegangen, dass die Einführung von Sharing-Fahrzeugen bewirkt, dass einige private Fahrzeuge nicht neu zugelassen werden. In diesem Szenario ersetzt ein Sharing-Fahrzeug im Jahr der Einführung zunächst ein konventionelles Fahrzeug. Diese Zahl steigert sich allerdings im Verlauf bis auf einen Wert von sieben Fahrzeugen. Diese Annahme ist vor allem durch eine gesteigerte Attraktivität des Angebots und einer damit einhergehenden Substitution zu erklären. Das gilt nicht für Sharing-Fahrzeuge, die neu zugelassen werden, weil sie im Vorjahr auf Grund des Alters aus der Flotte verschwunden sind.

Die folgende *Abb. 25* enthält die prognostizierte Anzahl der der Fahrzeuge verschiedenen Typs über die Jahre bis zum Prädiktionshorizont 2050 für das Eckszenario Automatisierung extrem.



**Abb. 25** Prognostizierter Bestand der Personenwagen der Schweiz nach den Annahmen des Flottenmodells im Extremszenario Pro Sharing bis 2050

In *Tab. 8* finden sich zur *Abb. 25* die entsprechenden Werte des Gesamtbestandes an Fahrzeugen sowie der automatisierten Fahrzeuge, jeweils aufgeteilt nach privaten und geteilt genutzten Fahrzeugen für die Zeitschritte 2030, 2040 und 2050.

**Tab. 8** Errechnete Werte für den Bestand der Personenwagen der Schweizer Flotte nach den Annahmen des Flottenmodells im Extremszenario Pro Sharing bis 2050

Jahr	2030	2040	2050
Anzahl PW gesamt	5'416'004	5'199'751	2'867'391
Anzahl PW privat	5'391'437	4'971'651	2'447'729
davon automatisiert	82'704 (1.5%)	682'913 (13.1%)	1'364'340 (47.6%)
Anzahl Sharing-PW	24'567 (0.5%)	228'100 (4.4%)	419'662 (14.6%)
Anteil AF gesamt	2.0%	17.5%	62.2%

#### 4.4.4 Extremszenario Trend Personenverkehr

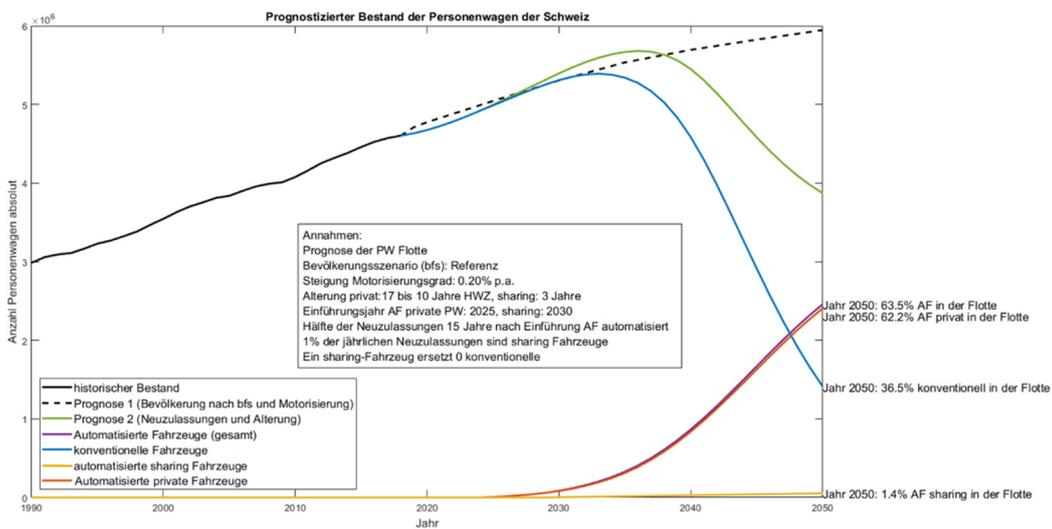
Es ist vorgesehen, ein weiteres Szenario zu betrachten, welches einen Extremfall im Hinblick auf die Automatisierung von privaten Fahrzeugen darstellen soll. Hierfür werden einige Annahmen dahingehend abgewandelt, dass sich ein grösserer Anteil automatisierter Fahrzeuge in der Flotte ergibt.

**Neuzulassungen:** In diesem Szenario sind weiterhin, wie auch im zuvor beschriebenen Trendszenario, 1 % der Neuzulassungen pro Jahr geteilt genutzte Fahrzeuge.

**Alterung:** Durch die Einführung der neuen Schlüsseltechnologie ändert sich die Alterung der privaten Personenwagen über die Zeit, sodass zu Beginn nach 17 Jahren die Hälfte der Fahrzeuge aus einem Jahrgang aus der Flotte verschwunden ist und nachdem die Sharing-Fahrzeuge eingeführt werden, sich diese Zeit auf 10 Jahre verringert. Für Sharing-Fahrzeuge liegt der 50 %-Wert bei 3 Jahren und der Übergangsbereich ist deutlich steiler als bei privaten Fahrzeugen. Sharing-Fahrzeuge werden, wenn sie zu alt werden und dadurch aus der Flotte verschwinden würden, im folgenden Jahr neu zugelassen.

**Automatisierung:** Für die Automatisierung der Personenwagenflotte wird davon ausgegangen, dass 15 Jahre nach Einführung, also im Jahr 2040, die Hälfte der Neuzulassungen automatisiert sein wird.

Die folgende *Abb. 26* enthält die prognostizierte Anzahl der Fahrzeuge verschiedenen Typs über die Jahre bis zum Prädiktionshorizont 2050 für das Extremszenario Trend.



**Abb. 26** Prognostizierter Bestand der Personenwagen der Schweiz nach den Annahmen des Flottenmodells im Extremszenario Trend bis 2050

In *Tab. 9* finden sich zur *Abb. 26* die entsprechenden Werte des Gesamtbestandes an Fahrzeugen sowie der automatisierten Fahrzeuge, jeweils aufgeteilt nach privaten und geteilt genutzten Fahrzeugen für die Zeitschritte 2030, 2040 und 2050.

**Tab. 9** Errechnete Werte für den Bestand der Personenwagen der Schweizer Flotte nach den Annahmen des Flottenmodells im Extremszenario Trend bis 2050

Jahr	2030	2040	2050
Anzahl PW gesamt	5'394'508	5'448'343	3'869'125
Anzahl PW privat	5'391'437	5'419'831	3'816'668
davon automatisiert	82'704 (1.5%)	838'172 (15.4%)	2'405'580 (62.2%)
Anzahl Sharing-PW	3'071 (0.1%)	28'512 (0.5%)	52'457 (1.4%)
Anteil AF gesamt	1.6%	15.9%	63.5%

## 4.5 Szenarien Güterverkehr

Analog zum Personenverkehr werden auch für die Prognose der Fahrzeugflotte des Güterverkehrs Szenarien formuliert. Es werden zwei Szenarien betrachtet, wobei eines die historischen Trends fortschreibt und ein weiteres eine extreme Variante darstellt, wobei höhere Werte für die Automatisierung der Fahrzeuge angenommen werden. Die Annahmen zu den beiden Szenarien werden im Folgenden kurz erläutert. Auch in diesen Szenarien werden keine disruptiven Entwicklungen betrachtet.

### 4.5.1 Trendszenario Güterverkehr

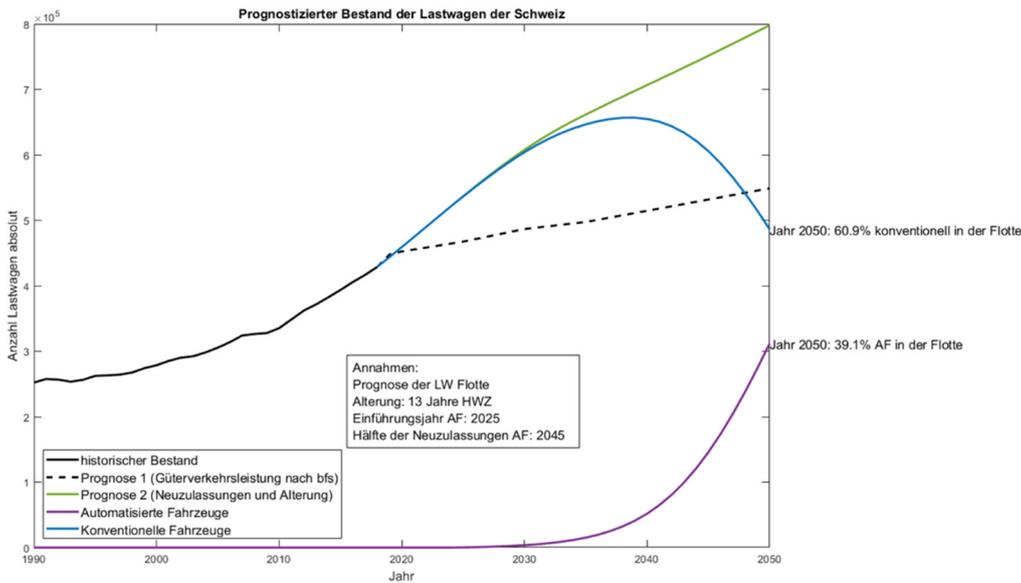
Das Trendszenario soll eine Flotte abbilden, die in den Trends der historischen Entwicklung der Schweizer Fahrzeugflotte des Güterverkehrs entspricht.

Neuzulassungen: Auf Basis der historischen Daten des Fahrzeugbestandes der Schweiz ergibt sich der Trend, dass ein steigender Anteil der Güterfahrzeugflotte neu zugelassene Fahrzeuge sind. Dieser Trend wird für das Trendszenario fortgeschrieben. Es wird von der prognostizierten Flottengrösse ausgegangen und für das Jahr 2020 ein Anteil von ca. 9 % davon als Neuzulassungen angenommen. Dieser Anteil steigt graduell bis auf einen Anteil von ca. 11 % im Jahr 2050.

Alterung: Für die Prognose der Alterung der Fahrzeugflotte werden die historischen Daten extrapoliert. Die Alterung der Fahrzeuge kann durch eine logistische Funktion angenähert werden. Damit kann für zukünftige Fahrzeug-Jahrgänge ermittelt werden, wie gross der Anteil ist, welcher zu einem definierten Zeitpunkt nach der Erstzulassung noch in der Fahrzeugflotte vorhanden ist. Der Anteil liegt also im Jahr der Neuzulassung bei 100 % und sinkt, bis er 0 % erreicht. Parameter sind hierbei der Übergangsbereich, der variiert werden kann, sowie die Jahreszahl, nach der 50 % der Fahrzeuge des Jahrgangs aus der Flotte verschwunden sind. Für Güterfahrzeuge liegt dieser Wert bei 13 Jahren. In diesem Szenario wird nicht berücksichtigt, dass die Einführung einer neuen Schlüsseltechnologie, wie das automatisierte Fahren, zu einer Beschleunigung des Fahrzeugersatzes führen kann.

Automatisierung: Für die Automatisierung der Güterfahrzeugflotte wird davon ausgegangen, dass erste automatisierte Fahrfunktionen des Levels 4 im Jahr 2025 verfügbar sein werden. Auch für die Prognose der Durchdringung der neuen Technologie in der Fahrzeugflotte wird ein logistischer Funktionsverlauf angenommen. Hiermit wird ermittelt, wie gross der Anteil automatisierter Fahrzeuge an der Gesamtzahl der neu zugelassenen Fahrzeuge in einem Jahr ist. Dieser Wert steigt entsprechend von 0 % auf 100 %. Die 50 %-Marke wird hier 20 Jahre nach Einführung, also im Jahr 2045 erreicht.

Die folgende *Abb. 27* enthält die prognostizierte Anzahl der Güterfahrzeuge über die Jahre bis zum Prädiktionshorizont 2050.



**Abb. 27** Prognostizierter Bestand der Lastwagen der Schweiz nach den Annahmen des Flottenmodells im Szenario Trend bis 2050

In Tab. 10 finden sich zur Abb. 27 die entsprechenden Werte des Gesamtbestandes an Fahrzeugen sowie der automatisierten Fahrzeuge für die Zeitschritte 2030, 2040 und 2050.

**Tab. 10** Errechnete Werte für den Bestand der Lastwagen der Schweizer Flotte nach den Annahmen des Flottenmodells im Trendszenario bis 2050

Jahr	2030	2040	2050
Anzahl LW gesamt	606'986	706'414	798'122
davon automatisiert	3'623 (0.6%)	51'734 (7.3%)	311'911 (39.1%)

#### 4.5.2 Extremszenario Trend Güterverkehr

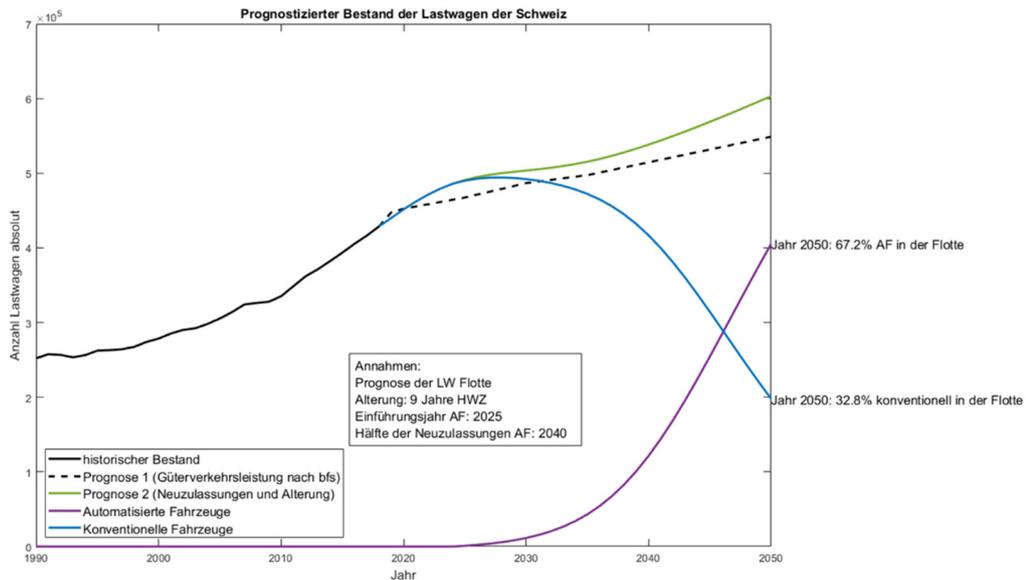
Es ist vorgesehen, ein weiteres Szenario zu betrachten, welches einen Extremfall im Hinblick auf die Automatisierung von Fahrzeugen des Güterverkehrs darstellen soll. Hierfür werden einige Annahmen dahingehend abgewandelt, dass sich ein grösserer Anteil automatisierter Fahrzeuge in der Flotte ergibt.

**Neuzulassungen:** Für die Neuzulassungen werden keine Änderungen im Vergleich zum zuvor beschriebenen Trendszenario vorgenommen.

**Alterung:** Für die Güterfahrzeuge in diesem Szenario wird angenommen, dass nach 9 Jahren die Hälfte der Fahrzeuge eines Jahrgangs nicht mehr im Bestand vorhanden sind. In diesem Szenario wird nicht berücksichtigt, dass die Einführung einer neuen Schlüsseltechnologie, wie das automatisierte Fahren, zu einer Beschleunigung des Fahrzeugersatzes führen kann.

**Automatisierung:** In diesem Szenario wird angenommen, dass bereits 15 Jahre nach Einführung des automatisierten Fahrens, also im Jahr 2040, die Hälfte der neu zugelassenen Güterverkehrsfahrzeuge automatisiert sein werden.

Die folgende Abb. 28 enthält die prognostizierte Anzahl der Güterfahrzeuge über die Jahre bis zum Prädiktionshorizont 2050.



**Abb. 28** Prognostizierter Bestand der Lastwagen der Schweiz nach den Annahmen des Flottenmodells im Extremszenario Trend bis 2050

In Tab. 11 finden sich zur Abb. 28 die entsprechenden Werte des Gesamtbestandes an Fahrzeugen sowie der automatisierten Fahrzeuge für die Zeitschritte 2030, 2040 und 2050.

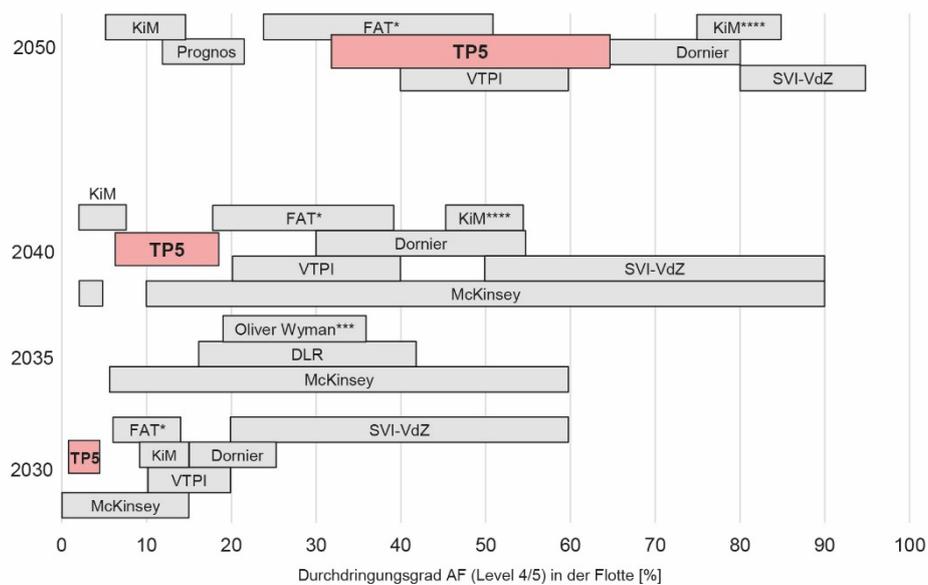
**Tab. 11** Errechnete Werte für den Bestand der Lastwagen der Schweizer Flotte nach den Annahmen des Flottenmodells im Extremszenario Trend bis 2050

Jahr	2030	2040	2050
Anzahl LW gesamt	503'550	538'260	603'170
davon automatisiert	11'422 (2.7%)	121'510 (22.6%)	405'310 (67.2%)

## 4.6 Bewertung der Szenarien

Um eine Vergleichsmöglichkeit mit den Ergebnissen der Studie Verkehr der Zukunft 2060 (EBP Schweiz AG und Rapp Trans AG, 2018) zu schaffen, wurde das hier entwickelte Flottenmodell mit den gleichen Annahmen des gemässigten Trendszenarios und Pro Sharing-Szenarios bis zum Jahr 2060 extrapoliert. In der Studie Verkehr der Zukunft 2060 wird geschlussfolgert, dass eine neue Fahrzeugtechnologie wie das automatisierte Fahren 25 bis 40 Jahre benötigt, bis sie 90 % einer Flotte ausmacht (EBP Schweiz AG und Rapp Trans AG, 2018). Mit dem hier entwickelten Flottenmodell errechnet sich, dass die Flotte im Jahr 2060 in den beiden gemässigten Szenarien zwischen ca. 70 % und ca. 95 % aus automatisierten Fahrzeugen bestehen wird. Da als Einführungsjahre 2025 und 2030 für private bzw. Sharing-Fahrzeuge angenommen wird, liegen die Ergebnisse des Pro Sharing-Szenarios in dem Bereich wie es auch die Studie Verkehr der Zukunft 2060 vorhersagt. Allerdings ist zu beachten, dass die Flottengrösse in diesem Szenario im hier errechneten Flottenmodell durch die geteilt genutzten Fahrzeuge erheblich sinkt. Für das Trendszenario sind auch nach 35 Jahren nach Einführung der Technologie (für Privatfahrzeuge im Jahr 2025) noch nicht 90 % der Flotte mit der Technologie ausgestattet.

Die untenstehende Abb. 29 zeigt einen Vergleich der hier errechneten Ergebnisse mit anderen Studien zu diesem Thema, die bereits in der Literaturrecherche im Kapitel 3.2 genannt wurden. Es ist zu erkennen, dass das Flottenmodell Durchdringungsgrade berechnet, die eher im unteren Bereich der Abschätzungen anderer Studien für die Jahre 2030 und 2040 liegt, für das Jahr 2050 liegt die Abschätzung etwa in der Mitte im Vergleich zu den anderen Studien, allerdings gibt es hier auch sehr grosse Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Forschungsergebnissen.



**Abb. 29** Vergleich der Ergebnisse der Durchdringung automatisierter Fahrzeuge in verschiedenen Studien (grau) und dem von TP5 entwickelten Flottenmodell (rot)

#### 4.6.1 Annahmen und Effekte im Flottenmodell

Die Berechnungen für die Durchdringung der automatisierten Fahrzeuge in der Fahrzeugflotte der Schweiz basieren auf einer Vielzahl von Annahmen. Eine Änderung in jeder Annahme kann das Ergebnis der Berechnung stark beeinflussen. Die folgende Tab. 12 gibt die Aspekte wieder, zu denen im Modell Annahmen getroffen wurden und beinhaltet mögliche Ausprägungen der Annahmen. Ausserdem wird beschrieben, wie die Grösse jeweils das Ergebnis, also die Durchdringung von AF beeinflusst.

**Tab. 12** Annahmen und Effekte im Flottenmodell

Annahme	Erläuterung / mögliche Ausprägungen	Einfluss auf Durchdringung AF
Fahrzeugbestand	Steigende Motorisierung → steigender Bestand. Sinkende Motorisierung → sinkender Bestand.	Hoher Bestand bewirkt grössere Mengen an Neuzulassungen und damit grössere Mengen an AF
Neuzulassungen	Anteil der Neuzulassungen am Bestand bleibt konstant, steigt oder sinkt.	Je mehr Neuzulassungen desto mehr AF, da diese nur bei den Neuzulassungen eingeführt werden.
Alterung der Fahrzeuge	Schnellere Alterung durch früheren Ersatz/Austausch der Fahrzeuge langsamere Alterung durch längere Nutzbarkeit der Fahrzeuge.	Schnellere Alterung bewirkt, dass konventionelle Fahrzeuge schneller aus der Flotte verschwinden und damit die Durchdringung von AF beschleunigt wird.
Einführung Automatisierung	Einführung AF in naher oder ferner Zukunft. AF in Privatflotte früher oder später als bei Sharing-Fahrzeugen.	Der Zeitpunkt der Einführung von AF verschiebt auch den Zeitpunkt ab dem die Durchdringung bestimmte Werte erreicht.
Anteil AF an Neufahrzeugen	Prozentualer Anteil der privaten AF und Sharing-AF an den neu zugelassenen Fahrzeugen eines Jahres steigt, sinkt oder bleibt konstant über die Zeit.	Der Anteil den die AF an den Neuzulassungen ausmachen beeinflusst wesentlich die Durchdringung.
Ersatzfaktor	Konventionelle Fahrzeuge werden durch die Zulassung von Sharing-Fahrzeugen nicht neu zugelassen oder weiterhin zugelassen.	Werden konventionelle Fahrzeuge durch Sharing-Fahrzeuge ersetzt, kann dies die Flottengrösse ändern und damit die Durchdringung der AF in der Flotte.



## 5 Zeitliche Strassenfreigabe für automatisiertes Fahren

Für die vorliegende Fragestellung der zeitlich-räumlichen Durchdringung von automatisierten Fahrzeugen ist die Freigabe von Strassen für AF von zentraler Bedeutung. Im folgenden Abschnitt wird von der Zuordnung und Klassifizierung von Strassen und deren Zuordnung zu einzelnen Raumtypen eine Einschätzung der zeitlich-räumlichen Freigabe vorgenommen. Dies basiert zum einen auf der Auswertung vorhandener Studien als auch auf eigenen Einschätzungen auf Grund von diversen Anforderungen.

### 5.1 Zuordnung der Strassentypen aus funktionaler Sicht

Die Zuordnung erfolgt auf Grundlage der Schweizer Norm VSS-40040B. Dabei wird das Strassennetz in Strassen mit unterschiedlicher Bedeutung unterteilt:

- Internationale und nationale Strassen
- Überregionale Strassen
- Regionale Strassen
- Zwischenörtliche Strassen
- Örtliche Strassen
- Quartierinterne Strassen

Die internationale bis zwischenörtliche Bedeutung bezieht sich auf Strassen ausserhalb besiedelter Gebiete, wo die Verbindungsfunktion der Strassen überwiegt. Örtliche und quartierinterne Bedeutung bezieht sich auf Strassen innerhalb der besiedelten Gebiete, bei welchen die Erschliessungs- und Sammelfunktion im Vordergrund steht.

Unter besiedelten Gebieten wird in diesem Zusammenhang ein Bereich verstanden, der ausser dem mit genereller Höchstgeschwindigkeit signalisierten Innerortsbereich auch einen Siedlungsbereich mit nur lockerer Bebauung umfasst.

Es werden insgesamt 5 Strassentypen unterschieden:

- Hochleistungsstrassen (HLS)
- Hauptverkehrsstrassen (HVS)
- Verbindungsstrassen (VS)
- Sammelstrassen (SS)
- Erschliessungsstrassen (ES)

Die folgende Tabelle fasst die Aspekte Bedeutung und Funktion der Strasse sowie den Strassentyp zusammen und bringt diese in einen funktionalen Zusammenhang. Die Strassentypisierung bildet die Grundlage für die vorgeschlagene strassenspezifische und räumlich differenzierte Unterteilung im Rahmen des vorliegenden Projekts.

**Tab. 13 Übersicht Strassentypisierung nach VSS-40040B**

Bedeutung im Strassennetz		international, national, überregional	regional	zwischen- örtlich	örtlich	quartier- intern
Aufgaben und Funktionen der Strasse						
Verkehrsplanerische Funktionen	Durchleiten	(HLS)	HLS, HVS			
	Verbinden	HLS, HVS	(HVS), VS	HVS, (VS)	SS	
	Sammeln			HVS, VS	(SS)	
	Erschliessen			VS		(ES)
Städtebauliche Aufgaben	Strassen als Aufenthalts- und Begegnungsraum				SS	(ES)
	Strassen als Freizeit- und Spielraum					ES

### 5.1.1 Modifikation der Strassentypen

Um die Anzahl der Strassentypen im vorliegenden Projekt zu reduzieren, werden funktional und bezüglich des Betriebsablaufs vergleichbare Strassentypen zusammengefasst. In diesem Zusammenhang wird vorgeschlagen, den Typ Verbindungsstrasse (VS) nicht weiter zu berücksichtigen, da dieser in Bezug auf die Ausbaugeschwindigkeit gemäss VSS-40080B der HVS sehr ähnlich ist (vgl. Tab. 14), sodass eine entsprechende Reduktion diesbezüglich unkritisch ist.

**Tab. 14 Bereiche der Ausbaugeschwindigkeit gemäss VSS-40080B**

Strassentyp	Ausbautyp $V_A$ [km/h] Lage bezüglich des besiedelten Gebietes	
	innerhalb	ausserhalb
Hochleistungsstrassen (HLS)	60 - 100	80 - 120
Hauptverkehrsstrassen (HVS)	40 - 60	60 - 80
Verbindungsstrassen (VS)	40 - 60	50 - 80

Auch aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf der HVS (innerhalb/ ausserhalb besiedelter Gebiete) wird ergänzend – abweichend zur VSS-40040B – die HVS im vorliegenden Projekt unterschieden in ausserorts (entspricht ausserhalb bebauter Gebiete mit zwischenörtlicher Verbindung) und innerorts (entspricht innerhalb bebauter Gebiete mit der Funktion verbinden/durchleiten). Dabei ist anzumerken, dass die HVS innerorts zunehmend in ihrem Erscheinungsbild auch einen «Aufenthaltscharakter» erhält, sodass die Trennung zwischen HVS und SS immer mehr aufweicht. Dies manifestiert sich in der Gestaltung und/oder dem Geschwindigkeitsregime (vgl. Ortsdurchfahrt Köniz etc.). Tab. 14 stellt die Übersicht der innerhalb des Projekts betrachteten Strassentypen dar.

**Tab. 15** Übersicht Auswahl für Analysen Mischverkehr

Bedeutung im Strassennetz		international, national, überregional	regional	zwischen- örtlich	örtlich	quartier- intern
Aufgaben und Funktionen der Strasse						
Verkehrsplanerische Funktionen	Durchleiten	HLS HVS (ausserorts)			HVS (ausserorts)	
	Verbinden			HVS (ausserorts)		
	Sammeln					
	Erschliessen					
Städtebauliche Aufgaben	Strassen als Aufenthalts- und Begegnungsraum				SS ES	
	Strassen als Freizeit- und Spielraum					

Eine alternative Einteilung der Strassentypen zu der oben dargestellten, bildet die Einteilung gemäss OpenStreetMap (OSM). Diese ist deshalb im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts interessant, da in MATSim die OSM-Strassentypen verwendet werden. Aus diesem Grund wird in der folgenden Tabelle eine Verbindung zwischen den Strassentypen gemäss VSS-40040B und gemäss OSM hergestellt, wie sie im Folgenden verwendet wird. Dabei ist anzumerken, dass eine exakte Vergleichbarkeit der Strassentypen nicht vorliegt, im Rahmen der vorliegenden Fragestellung ist die dargestellte Zuordnung jedoch ausreichend genau.

**Tab. 16** Zuordnung der Strassentypen der VSS-40040B nach Strassentypen gem. OSM

Strassentyp nach VSS-40040B	Strassentyp gem. OSM
HLS	motorway
	trunk
HVS (eher ausserorts)	primary
	secondary
HVS (eher innerorts)	tertiary
	unclassified
SS/ES	residential
	unknown

## 5.1.2 Räumliche Unterteilung

Es wurden – in Abstimmung mit dem TP6 (Räumliche Auswirkungen) – folgende Teilräume festgelegt:

- Kernstadt (Modellraum Zürich)
- Agglomeration/Suburban (Modellraum Zürich)
- Ländlicher disperser Raum mit ungerichteten Verkehrsbeziehungen (Modellraum Waadtland/Fribourg)
- Ländlicher Raum mit gerichteten Verkehrsbeziehungen (Modellraum Graubünden)

Damit lassen sich die oben aufgeführten Strassentypen den mit TP6 abgestimmten Teilräumen zuordnen.

**Tab. 17** Übersicht Auswahl an repräsentativen Strassentypen

Strassentyp	Raumtyp	Stadt	Agglo/ Suburban	Ländlich dispers	Ländlich gerichtet
HLS (Autobahn)			X		
HVS ausserorts (Landstrasse)				X	
ES/SS und HVS innerorts, (Stadtstrassen)		X			

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts erfolgt eine Fokussierung auf den Teilraum Zürich. Diese enthält die Kernstadt und die Agglomeration sowie den angrenzenden suburbanen Raum (vgl. dazu auch Kapitel 7.2).

## 5.2 Eignung von unterschiedlichen Strassentypen

Insgesamt fünf Einflussfaktoren (vgl. hierzu auch die Treiberanalyse unter Kapitel 3.3) sind von gesteigerter Relevanz für die Einschätzung der Eignung einzelner Strassentypen für AF:

- Infrastruktur sowie Betrieb und Unterhalt von Strecken und Knoten: Voraussetzungen sind lückenlose, durch die Fahrzeuge erkennbare Markierungen sowie aktuelle und vollständige digitale Strassenkarten als Rückfallebene. Ausserdem eine Überwachung und aktive Steuerung, z.B. für die Routenwahl und Strassensperrungen.
- Technologie: Entsprechende Sensorik zur Erfassung des Umfeldes, Computing zur Interpretation der Umgebungssituation (z.B. Kausalzusammenhänge erfassen).
- Ethik (grösserer Entscheidungsspielraum und Schadenspotenzial im städtischen Verkehr)
- Verbrauchernutzen (Monotonie in der Fahraufgabe vs. neue Angebotsformen und Nutzer)
- Gesetzgebung (Zulassung, Haftung, Verkehrsgesetzgebung).

Explizit nicht Teil dieser Betrachtung ist die Berücksichtigung des Schadensausmasses bei Unfällen mit automatisierten Fahrzeugen je Strassentyp, da hier grundsätzlich von der Gewährleistung der technischen Reife der Systeme für den jeweiligen Strassentyp ausgegangen wird und der Ausschluss systematischer Fehler als Rahmenbedingung vorausgesetzt wird.

Zum besseren Verständnis und als Ergänzung sind im Folgenden die massgebenden Spezifikationen der betrachteten Strassentypen gelistet:

Hochleistungsstrasse (HLS):

- richtungsgetrennte Fahrbahnen und Schutzeinrichtungen
- kreuzungsfrei
- kein Langsamverkehr
- relativ homogene Geschwindigkeitsprofile

Hauptverkehrsstrassen (HVS) ausserorts:

- bauliche Trennung der Richtungsfahrbahnen nicht zwingend gegeben
- plangleiche Knotenpunkte vorhanden
- hohe Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Verkehrsteilnehmern
- Langsamverkehr teilweise gestattet

Hauptverkehrsstrassen (HVS) innerorts und Erschliessungs- und Sammelstrassen (ES/SS):

- keine bauliche Trennung von Richtungsfahrbahnen
- plangleiche Knotenpunkte
- hohe Diversität an Verkehrsteilnehmern

Im Rahmen des vorliegenden Projekts werden Systeme des Levels 4 nach SAE-Einteilung betrachtet. Das bedeutet, dass der Fahrer als Rückfallebene im definierten Anwendungsfall nicht mehr zur Verfügung steht. Demnach muss das Fahrzeug auf den entsprechenden Strassentypen und auch in den jeweiligen betrachteten Räumen im definierten Anwendungsfall alle möglichen Fahrsituationen eigenständig ausführen können.

Für die Einführung automatisierter Fahrzeuge des Levels 4 auf den unterschiedlichen Strassentypen ergeben sich aus den oben genannten Faktoren die folgenden Einschätzungen. Dabei wird eine relative Bewertung der Auswirkungen der verschiedenen Aspekte auf die Nutzbarkeit der Strassentypen durchgeführt. Diese zeigt ein vergleichbares Bild wie die Beurteilung hinsichtlich der allgemeinen Nutzbarkeit der untersuchten Strassentypen und bestätigt somit die festgestellte Tendenz.

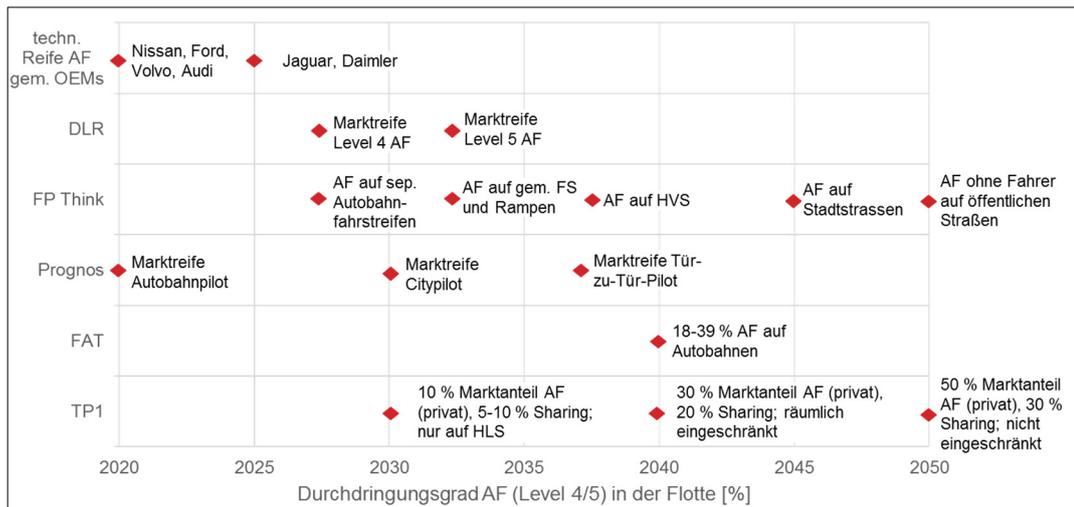
**Tab. 18** Einfluss der massgebenden Faktoren, die die Einführung von AF treiben, auf die Strassentypen

Einflussfaktoren	HLS	HVS ausserorts	ES/SS und HVS innerorts
Infrastrukturausrüstung	Einheitliche und weitgehend vollständige Markierung ist bereits vorhanden. Autobahnen sind in den digitalen Karten <sup>1</sup> bereits heute vollständig vorhanden.	Einheitliche und weitgehend vollständige Markierung ist mehrheitlich vorhanden. Die HVS sind in den digitalen Karten <sup>1</sup> vollständig vorhanden.	Einheitliche Markierungen sind mehrheitlich vorhanden, aber die Qualität der Markierungen ist als kritisch zu beurteilen. Die innerstädtischen Strassen sind nicht vollständig in digitalen Karten <sup>1</sup> vorhanden.
Betrieb und Unterhalt	Anpassungen und Unterhalt sowie Überwachung und allfällige Steuerung erfolgen durch einen Betreiber (ASTRA).	Anpassungen und Unterhalt sowie Überwachung und allfällige Steuerung erfolgen durch eine Vielzahl an Betreibern (Kantone) was anspruchsvoller ist und sich negativ auf eine lückenlose Bereitstellung auswirken könnte.	Anpassungen und Unterhalt sowie Überwachung und allfällige Steuerung erfolgen durch eine Vielzahl an Betreibern (Städte bzw. Gemeinden), was sich negativ auf eine lückenlose Bereitstellung auswirken könnte. Eine Nachrüstung einzelner Städte ist jedoch denkbar und ermöglicht abgegrenzte funktionale Netze mit überschaubarer räumlicher Ausdehnung, was sich als Anwendungsfall eignen würde.
Beurteilung	+	0	0

<sup>1</sup> Gegenüber den heutigen digitalen Karten, wie sie in Navigationssystemen verbaut sind, müssen s.g. hochpräzise HD-Karten bereitgestellt werden. Gegenüber klassischen Verkehrsdaten sind hier nicht nur relevante Wegpunkte wie Tankstellen, Parkplätze u.dgl. hinterlegt. Hinzu kommen unter anderem Informationen zu Brücken- und Durchfahrts Höhen, Strassenbreiten oder Gewichtsbegrenzungen. In Abhängigkeit von Grösse, Gewicht, Ladung und Maximalgeschwindigkeit wird die jeweils optimale, massgeschneiderte Route für das jeweilige Fahrzeug ermittelt (vgl. Strijbosch und Kuther: Mit hochpräzisierten HD-Karten wird autonomes Fahren machbar, IN: Elektronik Praxis, 2017).

<b>Einflussfaktoren</b>	<b>HLS</b>	<b>HVS ausserorts</b>	<b>ES/SS und HVS innerorts</b>
Technologie	Hohe Geschwindigkeiten erfordern grosse Sensorreichweiten, Umgebungssituationen sind wenig komplex, Interpretation relativ einfach.	Hohe Geschwindigkeiten erfordern grosse Sensorreichweiten, Umgebungssituationen sind teilweise komplex, Interpretation teilweise schwierig.	Geringe Geschwindigkeiten erfordern weniger grosse Sensorreichweiten, Umgebungssituationen sind häufig komplex, Interpretation oft sehr schwierig.
<i>Beurteilung</i>	+	-	-
Ethik	Schadenspotenzial mittel (kein Langsamverkehr und Nutzungstrennung).	Schadenspotenzial sehr hoch, da hohe Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Verkehrsteilnehmern (MIV/LV) bestehen, kann dies im Falle eines Unfalls zu einem sehr grossen Schaden führen.	Schadenspotenzial mittel, da durch die niedrigen Geschwindigkeiten das Schadensmass bei einem Unfall geringer ist.
<i>Beurteilung</i>	0	-	0
Verbrauchernutzen	Monotonie der Fahraufgabe und geringe Beschleunigungen führen zu einer guten Nutzbarkeit der Zeit.	Monotonie der Fahraufgabe führt zu einer guten Nutzbarkeit der Zeit, Erschliessung entlegener Gebiete.	Neue Angebotsformen und Nutzergruppen.
<i>Beurteilung</i>	+	+	+
Gesetzgebung	wenig komplexe und definierbare Anwendungsfälle.	teilweise komplexe und schwer definierbare Anwendungsfälle.	teilweise komplexe und schwer definierbare Anwendungsfälle.
<i>Beurteilung</i>	+	-	-
<b>Gesamtbeurteilung</b>	<b>++</b>	<b>--</b>	-

Es zeigt sich deutlich, dass die HLS klar vor der HVS ausserorts für eine Erstzulassung von AF zu präferieren ist. Die HVS innerorts und die ES/SS liegen in der Beurteilung dazwischen. Im Rahmen von Expertengesprächen und durch die Auswertung von Studien (bspw. bfu (Uhr, 2016); (EBP Schweiz AG, 2017); (KIM Netherlands Institute for Transport Policy Analysis, 2017), (Bierstedt, et al., 2014); (Altenburg, et al., 2018); (Krause, et al., 2017)) konnte die Einschätzung der Grobbeurteilung bestätigt werden. Die Ergebnisse der Auswertung der oben erwähnten Studien sind im Folgenden dargestellt und zeigen ebenfalls die Tendenz einer schrittweisen Einführung von automatisierten Fahrzeugen.



**Abb. 30** Übersicht der Schätzungen für Durchdringungsgrade und Einführungszeitpunkte von AF-Level 4/5 (Anteil und Strassentyp) verschiedener Studien

### 5.2.1 Schrittweise Freigabe der Strassentypen

Die Summe der oben dargelegten Erkenntnisse führt zusammenfassend zur Einschätzung, dass zuerst die HLS, dann die ES/SS und HVS innerorts und als letztes die HVS ausserorts für die automatisierten Fahrzeuge Level 4 vollumfänglich nutzbar sein werden. Dies bedeutet aber nicht, dass in abgegrenzten Räumen einzelne Strassenzüge oder Gebiete u.U. schon früher nutzbar sein werden und sich deren Umfang zwischen den genannten Zeitschritten schrittweise erweitert. Dies deckt sich auch mit den Zwischenergebnissen des TP4 bzgl. einer schrittweisen räumlichen Ausbreitung der spezifischen Anwendungsfälle der unterschiedlichen Angebotsformen (Nutzungsentfaltung). Insbesondere ist es gut denkbar, dass in den Städten in einzelnen für automatisierte Fahrzeuge freigegebenen Teilräumen bereits schon um 2030 automatisierte Fahrzeuge zugelassen sein werden (vgl. z.B. den Stadtteil One-North in Singapur, in welchem im Rahmen eines Versuchs automatisierte Fahrzeugen im regulären Strassenbetrieb mitfahren). Gleiches gilt analog für HVS-Abschnitte, die für einen funktionalen Netzschluss auch frühzeitig für automatisierte Fahrzeuge freigegeben werden.

Die folgende Tabelle zeigt zusammenfassend die im Rahmen des vorliegenden Projekts angenommene zeitliche Reihenfolge der vollumfänglichen Nutzbarkeit der verschiedenen Strassentypen für automatisierte Fahrzeuge (Level 4) und dient als Grundlage für die entsprechenden MATSim-Simulationen (TP2). Dabei ist anzumerken, dass die angegebenen Zeitschritte durch die vorliegende Projektorganisation gegeben sind und im vorliegenden Zusammenhang nur als grobe Orientierung zu verstehen sind. Wichtiger ist die relative Reihenfolge der Nutzbarkeit der Strassentypen.

**Tab. 19** Übersicht prognostizierte vollumfängliche Nutzbarkeit durch AF-Level 4 je Strassentypen

Strassentyp	Jahr	2020	2030	2040	2050
HLS (Autobahn)		✗	✓	✓	✓
HVS ausserorts (Landstrasse)		✗	✗	✓*	✓
ES/SS und HVS innerorts (Stadtstrassen)		✗	✓*	✓	✓

Bemerkung zu Tab. 19 und Lesehilfe:

- ✓ vollumfängliche Nutzbarkeit AF-Level 4 in allen Räumen
- ✓\* räumlich eingeschränkte Nutzbarkeit AF-Level 4 auf ausgewählten Relationen oder Gebieten (z.B. Stadt Zürich für automatisierte Taxiflotten als Erstanwender 2030 oder z.B. Verbindungsstrecken zwischen HLS-Anschlüssen und bereits für AF nutzbaren Stadtstrassen 2040)
- ✗ Strassentyp ist für AF-Level 4 noch nicht nutzbar (Ausnahmen bilden Pilotstrecken)

### Exkurs: Strassenfreigabe in MATSim

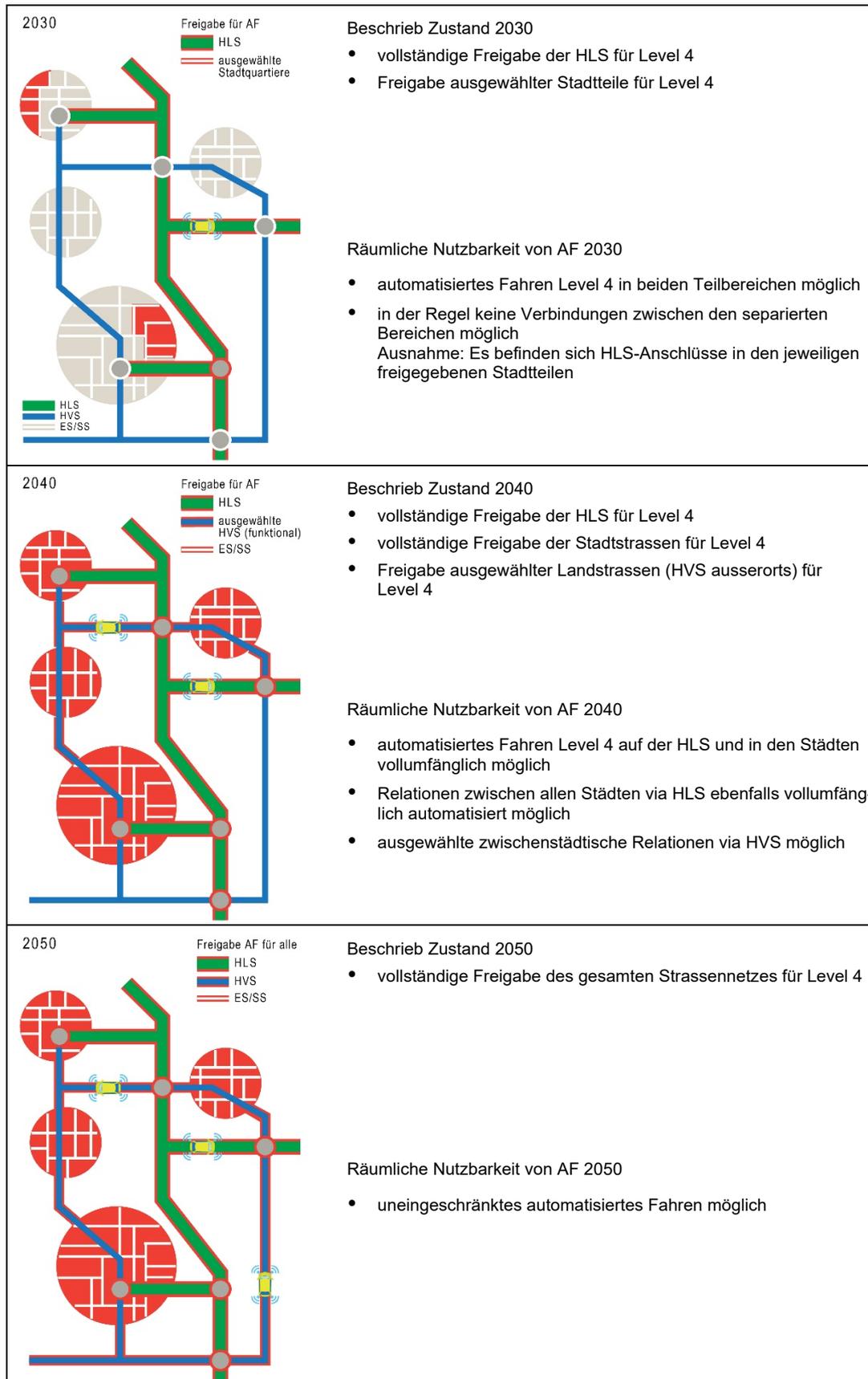
Die räumlich und zeitlich differenzierte Strassenfreigabe für AF wirkt sich im MATSim-Modell nicht direkt auf das Verkehrsverhalten der Agenten aus, da auch die nicht für AF freigegebenen Strassen von AF befahren werden können, dann jedoch konventionell gesteuert werden (ausschliesslich Auswirkungen auf PCU vgl. TP2). Die AF sind somit in Bezug auf den verwendeten Modellierungsansatz Level 4-Fahrzeuge. Raumdifferenzierte Effekte aufgrund der zeitlich gestaffelten Strassenfreigabe können deshalb nicht abgebildet werden. Eine Anpassung dieser modelltechnischen Restriktionen wird für die weiteren Arbeiten im Forschungspaket empfohlen.

## 5.2.2 Funktionale Strassennutzung

Die zeitliche Zulassung bzw. technische Freigabe der Strassen ist auch im Lichte einer funktionalen Strassennutzung zu sehen. Um eine möglichst zweckmässige und ein in Bezug auf die Wegekette sinnhaftes Angebot bereitzustellen, sollten die einzelnen freigegebenen Strassentypen auch räumlich optimal verknüpft werden (vgl. dazu auch Nutzungsentfaltung der Angebotsformen gemäss TP4 des vorliegenden Forschungsprojekts).

An den jeweiligen Endpunkten, an welchen das automatisierte Fahrzeug (Level 4) die für einen automatisierten Fahrbetrieb freigegebene Strasse verlassen wird, muss der Fahrzeuginsasse das Fahrzeug wieder selber übernehmen oder, falls die Möglichkeit nicht besteht (kein Fahrausweis oder kein konventioneller Fahrbetrieb möglich, z.B. Robotertaxi), endet die Fahrt an der Grenze des für automatisiertes Fahren freigegebenen Bereichs.

Die folgende Darstellung zeigt mögliche funktionale Netze in den Zeitschritten 2030 bis 2050, in welchen das Strassennetz schrittweise für automatisierte Fahrzeuge freigegeben wird.



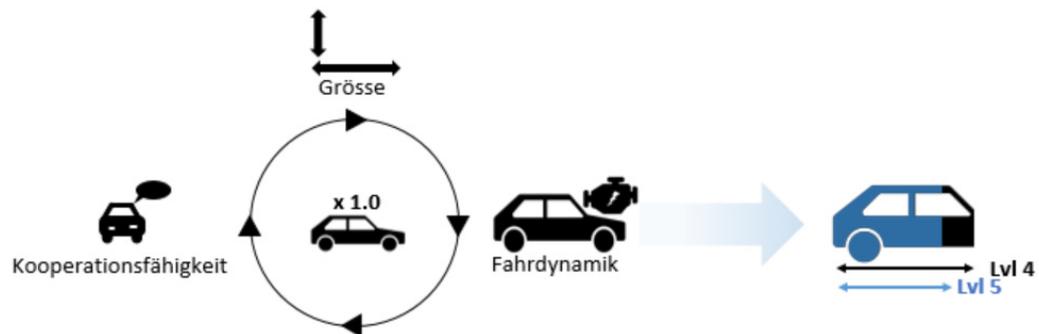
**Abb. 31** Beispiel einer möglichen zeitlich-räumlichen Strassenfreigabe bzgl. der Netz-funktionalität

### 5.3 Einfluss des Automatisierungsgrades sowie der Antriebstechnik auf die PCU

Um den Einfluss automatisierter Fahrzeuge im Mischverkehr, vor allem im Hinblick auf die Simulation in TP2, quantifizieren zu können, wurden innerhalb des TP5 die Haupteinflussgrößen und -unterschiede von automatisierten Fahrzeugen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen wie folgt identifiziert:

- **Kooperationsfähigkeit:** Die Kooperationsfähigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Fahrzeugs, sich mit anderen Verkehrsteilnehmern oder der Strasseninfrastruktur zu vernetzen, Informationen auszutauschen und gemeinsame Strategien zu entwickeln. Es ist zu erwarten, dass der Einfluss über die nächsten Jahre zunimmt, da sowohl der Durchdringungsgrad an AF, als auch die Ausstattungsrate der Infrastruktur zunehmen werden.
- **Physische Grösse:** Die physische Grösse beschreibt die Ausmasse verschiedener Fahrzeuggruppen und -klassen und quantifiziert somit deren Platzbedarf. Je nach Angebotsform aus TP4 fallen hier unterschiedlich grosse Einflüsse an.
- **Fahrdynamik:** Die Fahrdynamik beschreibt das Beschleunigungs- und Agilitätsverhalten des Fahrzeugs. Je nach Angebotsform aus TP4 fallen hier unterschiedlich grosse Einflüsse an.

Ähnlich wie bei der Umrechnung von Lastwagen in sog. Pkw-Einheiten, kann auch für automatisierte Fahrzeuge der raumzeitliche Platzbedarf durch solche Einheiten ausgedrückt werden. Die Abb. 32 zeigt schematisch die Umrechnung der Eigenschaften des Fahrzeugs in die entsprechenden Pkw-Einheiten (PCU).



**Abb. 32** Veranschaulichung der Herleitung von PCU-Werten über die Faktoren Kooperationsfähigkeit, Grösse und Fahrdynamik

Aus den genannten Einflussgrößen wurden im TP5 die Grundlagen für ein PCU-Faktorenmodell entwickelt, welches von TP2 (EBP) weiterentwickelt wurde und dann eine Grundlage für die Simulationsarbeiten in TP2 (IVT) darstellt. Dieses basiert auf den grundlegenden Überlegungen aus «Passenger Car Units in Saturation Flows: Concept, Definition, Derivation» (Kimber, et al., 1984). Das PCU-Faktorenmodell errechnet den «raumzeitlichen Platzbedarf» eines Fahrzeugs und soll das mögliche Optimierungspotenzial von automatisierten Fahrzeugen im Verkehrsfluss beschreiben. Dabei wurden für sämtliche Angebotsformen des TP4 die Änderung der drei genannten Einflussgrößen im Vergleich zu einem konventionell gesteuerten PW abgeschätzt und miteinander verrechnet, sodass eine erste Annäherung der jeweiligen PCU-Werte an das TP2 übergeben werden konnte (vgl. Tab. 20). Die weitere Verwertung der PCU sowie deren Überprüfung und Anpassung für die Modellierung in MATSim und die Auswahl der Angebotsformen aus TP4 wird im Schlussbericht des TP2 beschrieben.

**Tab. 20** Zuordnung von der durch TP5 abgeschätzten PCU zu den Angebotsformen von TP4 als Grundlage für die Weiterverarbeitung in TP2

	Angebotsformen			PCU-Faktorenmodell			
	Angebotsform	TP 4 Referenz	zugelassener Straßentyp	Kooperationsfähigkeit	Größe	Fahrdynamik	PCU
Einspur-Mob.	Kraftrad	NA	HLS, nicht HLS	1.00	0.25	0.75	0.2
	Pod	MyPod und TwoPod	nicht HLS	0.68	0.25	0.75	0.1
Privater MIV	PW 0-2	MyCar, CityTaxi, HoliTaxi Level 0-2	HLS, nicht HLS	1.00	1.00	1.00	1.0
	PW 3	MyCar, CityTaxi, HoliTaxi Level 3	HLS, nicht HLS	0.90	1.00	1.00	0.9
	PW 4	MyCar, CityTaxi, HoliTaxi Level 4	HLS, nicht HLS	0.77	1.00	1.00	0.8
	PW 5	MyCar, CityTaxi, HoliTaxi Level 5	HLS, nicht HLS	0.68	1.00	1.00	0.7
	LivingCar	LivingCar	HLS, nicht HLS	0.68	2.00	1.25	1.7
Sharing	Sharing 0-2	YourCar Level 0-2	HLS, nicht HLS	1.00	1.00	1.00	1.0
	Sharing 3	YourCar Level 3	HLS, nicht HLS	0.90	1.00	1.00	0.9
	Sharing 4	YourCar Level 4	HLS, nicht HLS	0.77	1.00	1.00	0.8
	Sharing 5	YourCar Level 5	HLS, nicht HLS	0.68	1.00	1.00	0.7
	SizeSharing 0-2	HoliTaxiHub, PubliTaxi, NightBus, FarBus Level 0-2	HLS, nicht HLS	1.00	1.00	1.25	1.3
	SizeSharing 3	HoliTaxiHub, PubliTaxi, NightBus, FarBus Level 3	HLS, nicht HLS	0.90	1.00	1.25	1.1
	SizeSharing 4	HoliTaxiHub, PubliTaxi, NightBus, FarBus Level 4	HLS, nicht HLS	0.77	1.00	1.25	1.0
	SizeSharing 5	HoliTaxiHub, PubliTaxi, NightBus, FarBus Level 5	HLS, nicht HLS	0.68	1.00	1.25	0.9
	ShareTonomy	ShareTonomy	HLS, nicht HLS	0.68	1.00	1.00	0.7
ÖV	Fern-Bus 0-2	PeakBus, FlexBus Level 0-2	HLS, nicht HLS	1.00	2.00	1.30	2.6
	Fern-Bus 3	PeakBus, FlexBus Level 3	HLS, nicht HLS	0.90	2.00	1.30	2.3
	Fern-Bus 4	PeakBus, FlexBus Level 4	HLS, nicht HLS	0.77	2.00	1.30	2.0
	Fern-Bus 5	PeakBus, FlexBus Level 5	HLS, nicht HLS	0.68	2.00	1.30	1.8
	Stadt-Bus 0-2	LineBus Level 0-2	nicht HLS	1.00	2.00	1.30	2.6
	Stadt-Bus 3	LineBus Level 3	nicht HLS	1.00	2.00	1.30	2.6
	Stadt-Bus 4	LineBus Level 4	nicht HLS	1.00	2.00	1.30	2.6
	Stadt-Bus 5	LineBus Level 5	nicht HLS	0.90	2.00	1.30	2.3



## 6 Auswertung und Interpretation der MATSim-Umlegungen

Im Rahmen des vorliegenden Forschungspakets wurde durch das TP2 ein MATSim-Modell aufgebaut, die Verkehrsnachfrage für die Zeitschritte 2030, 2040, 2050 berechnet und auf das Schweizer Strassennetz umgelegt. Die Modellberechnungen basieren u.a. auf den Ergebnissen des Flottenmodells des TP5 (vgl. Kapitel 4.3), des PCU-Modells (vgl. Kapitel 5.3) und der Freigabe der einzelnen Strassentypen (vgl. Kapitel 5.2). In Abstimmung zwischen allen TP und der GPL wurden zwei unterschiedliche Szenarien in MATSim für die drei genannten Zeitschritte berechnet. Zum einen das Trendszenario (Szenario A; vgl. Kapitel 4.4.1) und zum anderen das Extremszenario Pro Sharing (Szenario B; vgl. Kapitel 4.4.3). Ein Ziel der Szenariodefinition ist es, möglichst grosse Unterschiede bzgl. der raum-differenzierten Durchdringung der AF aufzuzeigen und so die mögliche Spannweite einer zukünftigen Entwicklung abstecken zu können. Je Szenario werden zudem zwei verschiedene Fokusbereiche festgelegt. Zum einen der Blick auf die gesamte Schweiz mit dem Ziel, die Ausbreitung der privaten AF in der Schweiz zu erkennen (Szenario private AF) und zum anderen der Fokus auf verschiedene Teilräume (vgl. dazu TP6). In diesen werden neben der Ausbreitung der privaten AF auch die Effekte einer automatisierten Sharing-Flotte modelliert. Im Zusammenhang mit den folgenden Auswertungen erfolgt eine Fokussierung auf die Stadt und die Agglomeration Zürich. Es existieren darüber hinaus zwei weitere Teilgebiete (Bereich Chur und Bereich Fribourg), die jedoch im Rahmen von TP5 nicht weiter berücksichtigt werden. Die folgende *Abb. 33* zeigt die berechneten Szenarien und die beiden Fokusbereiche.

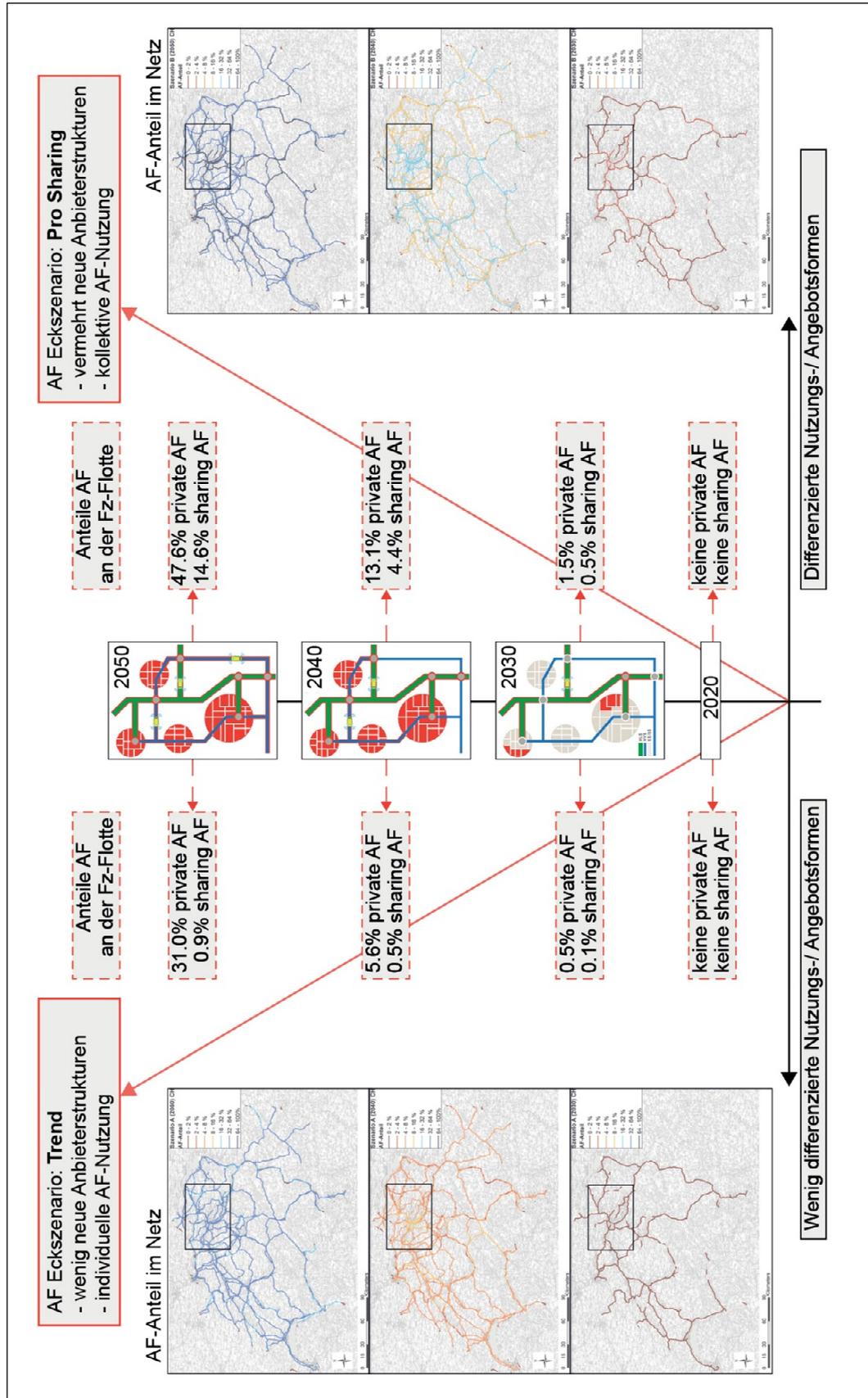


Abb. 33 Übersicht und Einordnung MATSim-Umlegungen des TP2

In den folgenden Abschnitten werden die von TP2 berechneten Modellergebnisse der unterschiedlichen Szenarien (A und B) je Zeitschritt (2030, 2040, 2050) und Fokusbereich (Schweiz, Zürich) grafisch aufbereitet, ausgewertet und mit Fokus auf die Durchdringung und den Mischverkehr interpretiert.

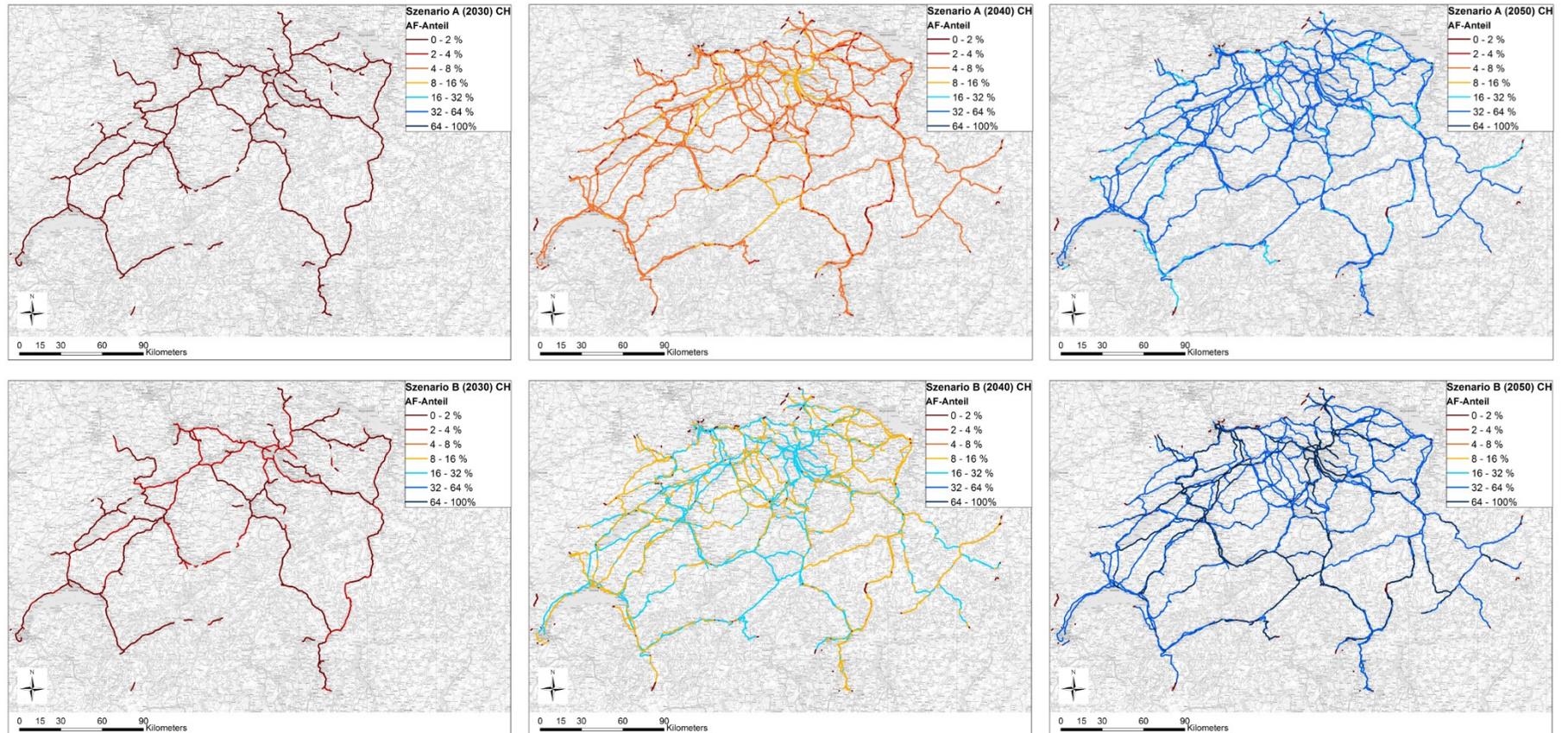
## 6.1 Raumdifferenzierte Auswertung der Durchdringung mit Fokus Schweiz

Die folgenden grafischen Auswertungen der MATSim-Ergebnisse basieren immer auf dem Tagesverkehr (DWV), da dieser den besten Überblick über die grundsätzliche Verteilung der AF im Netz unabhängig von der Tageszeit abbildet. Für die detaillierten Auswertungen bzgl. Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems werden teilweise auch Spitzenstundenwerte berücksichtigt (vgl. dazu Kapitel 7). Die im Folgenden ausgewerteten Verkehrszahlen sind ein Ergebnis des TP2 und werden vom TP5 für weiterführende Auswertungen übernommen. Detailliertere Erläuterungen zur Methodik und den in MATSim verwendeten Algorithmen und Parameter, zur Modellgenauigkeit und zur Herleitung der Ergebnisse sind dem Schlussbericht des TP2 zu entnehmen.

### AF-Anteile im Netz

Die MATSim-Ergebnisse zeigen in Bezug auf die gesamte Schweiz, dass der AF-Anteil über die Zeitschritte flächig zunimmt. Die Anteile bewegen sich im Szenario A mehrheitlich zwischen 0 % - 2 % im Jahr 2030 und erhöhen sich bis 2050 auf 32 % - 64 %. In den folgenden Abbildungen ist die zeitliche Durchdringung der privaten AF im Szenario A (linke Spalte) für die Zeitschritte 2030 bis 2050 dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass im Szenario über die gesamte Schweiz keine Sharing-AF modelliert werden. Die beschriebenen Anteile und folgenden Abbildungen zeigen somit ausschliesslich privat genutzte AF. Zudem werden auch ausschliesslich die AF-Anteile der PW ausgewertet. Der Güterverkehr ist in MATSim anhand eines fixen Fahrplans modelliert und wird deshalb bei den folgenden Auswertungen zur räumlichen Durchdringung nicht berücksichtigt.

Im Szenario B zeigen sich vergleichbare Entwicklungen, wobei die AF-Anteile aufgrund der extremen Annahmen insgesamt höher liegen (vgl. rechte Spalte). Diese bewegen sich im Jahr 2030 zwischen 0 % - 4 % und erhöhen sich bis 2050 auf teilweise über 64 %. Insbesondere im Szenario B zeigt sich im Jahr 2050, dass auf den wichtigen nationalen HLS-Abschnitten der A1 (Bereiche Bern und Zürich), der A2 (Abschnitt zwischen Luzern und Lugano) und der A3 (Bereiche Basel und Zürich) die AF-Anteile im Vergleich tendenziell höher sind.



**Abb. 34** Anteile automatisierter Fahrzeuge auf dem Schweizer Strassennetz in den Zeitschritten 2030, 2040 und 2050

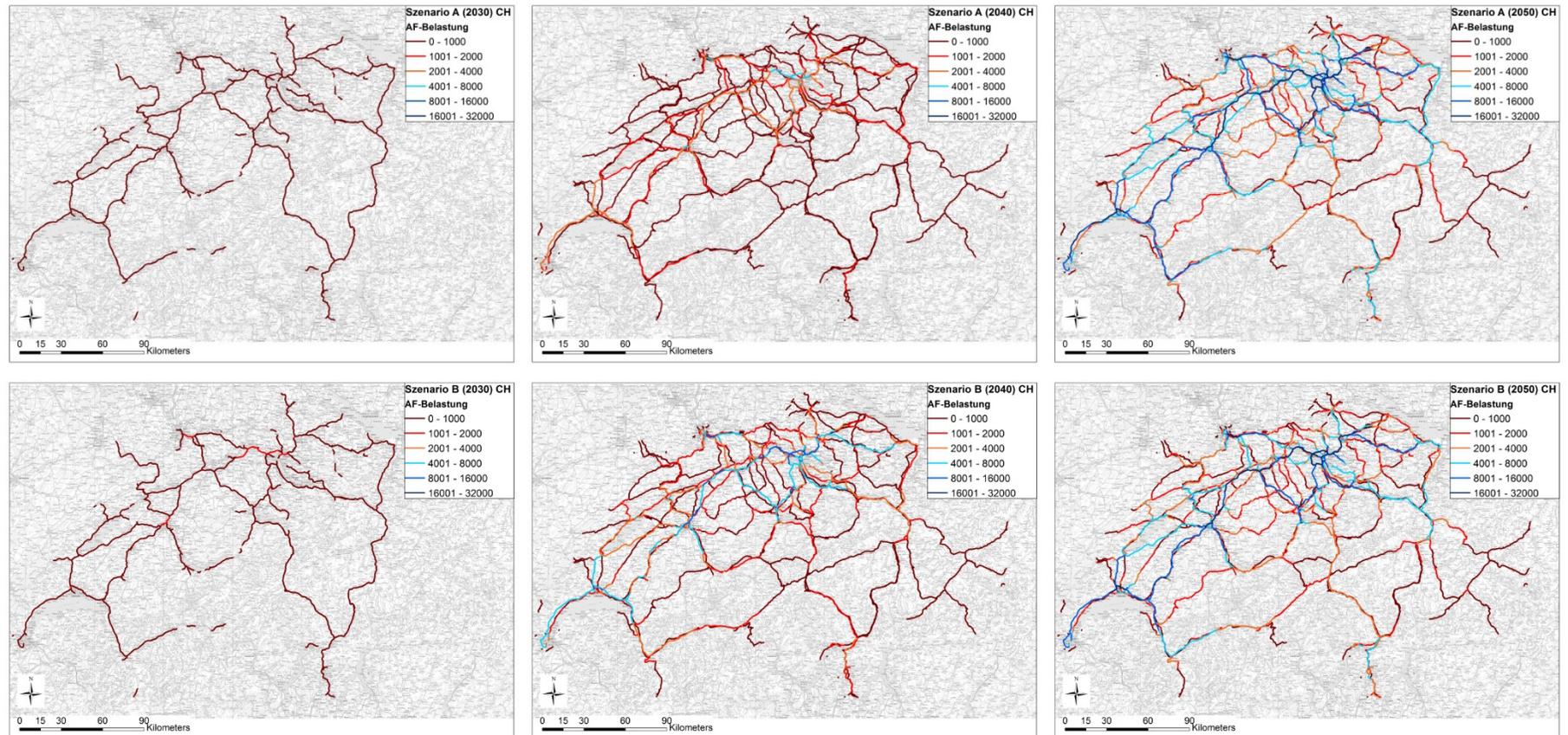
Vergleicht man die Flottenanteile der AF (vgl. Kapitel 4.3) mit deren Anteilen an der Verkehrsmenge im Netz zeigt sich, dass der AF-Anteil im Mittel im Netz höher ist, als in der Flotte. Dies legt nahe, dass AF stärker genutzt werden als konventionelle Fahrzeuge. Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich der AF-Flottenanteile mit den AF-Anteilen im Netz für die drei Zeitschritte (2030, 2040, 2050) und die beiden Szenarien A und B.

**Tab. 21** Vergleich der AF-Anteile im Netz (MATSim) und in der Flotte (Flottenmodell)

Vergleich der AF-Anteile im Netz (MATSim) und in der Flotte (Flottenmodell)		2030	2040	2050
Szenario A (gesamte Schweiz)	AF-Anteil in der Flotte gemäss Flottenmodell	0.5 %	5.6 %	31.0 %
	mittlere AF-Anteile im Netz gemäss MATSim	0.6 %	6.9 %	37.9 %
Szenario B (gesamte Schweiz)	AF-Anteil in der Flotte	1.5 %	13.1 %	47.6 %
	mittlere AF-Anteile im Netz gemäss MATSim	1.9 %	16.3 %	61.0 %

### Absolute AF-Belastungen im Netz

Die hohen AF-Anteile auf den wichtigen HLS-Achsen der A1, A2 und A3 führen bei der Betrachtung der absoluten AF-Belastungen zum Ergebnis, dass auf den genannten Achsen auch die meisten AF fahren. Insbesondere im Grossraum Zürich werden auch im Szenario A (2050) bereits Belastungen von über 8'000 AF (je Fahrtrichtung) auf einzelnen Streckenabschnitten der A1 erreicht. Im Szenario B weisen die Modellergebnisse 2050 im gesamten Verlauf der A1 AF-Belastungen in der entsprechenden Grössenordnung auf. Im Folgenden sind die Entwicklungen der absoluten AF-Belastungen im Netz für die Zeitschritte 2030, 2040 und 2050 (Zeilen 1 bis 3) sowie für die beiden Szenarien A (linke Spalte) und Szenario B (rechte Spalte) dargestellt. Die Abbildung für das Jahr 2030 zeigt ausschliesslich das HLS-Netz, da zu diesem Zeitpunkt auf anderen Strecken noch keine Fahrzeuge im automatisierten Modus fahren können (Ausnahme bilden ausgewählte Städte vgl. dazu Kapitel 6.2).

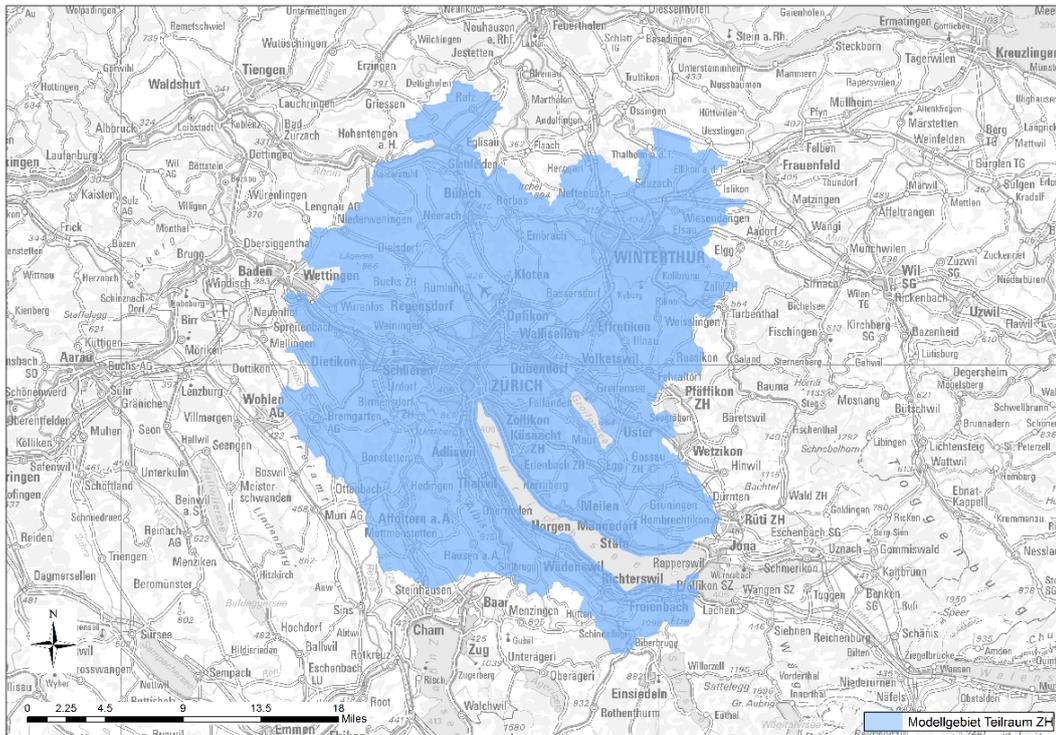


**Abb. 35** Belastung des Schweizer Strassennetzes mit automatisierten Fahrzeugen in den Zeitschritten 2030, 2040 und 2050

Betrachtet man die Entwicklungen zwischen den Zeitschritten 2030 und 2040 bzw. zwischen 2040 und 2050, zeigen die Modellergebnisse eine beschleunigte Ausbreitung der AF im zweiten Zeitabschnitt. Dies beruht auf der starken Zunahme der AF-Flotte in diesem Zeitraum und wird durch die Freigabe der zusätzlichen Strassentypen in diesem Zeitraum begünstigt.

## 6.2 Raumdifferenzierte Auswertung der Durchdringung mit Fokus auf den Teilraum Zürich

Die Analyse der AF-Diffusion im Teilraum Zürich unter zusätzlicher Berücksichtigung einer Sharing-AF-Flotte zeigt die folgende zeitlich-räumliche Durchdringung der AF im Netz. Das Modellgebiet in MATSim für Zürich ist in der folgenden Abbildung blau eingefärbt.

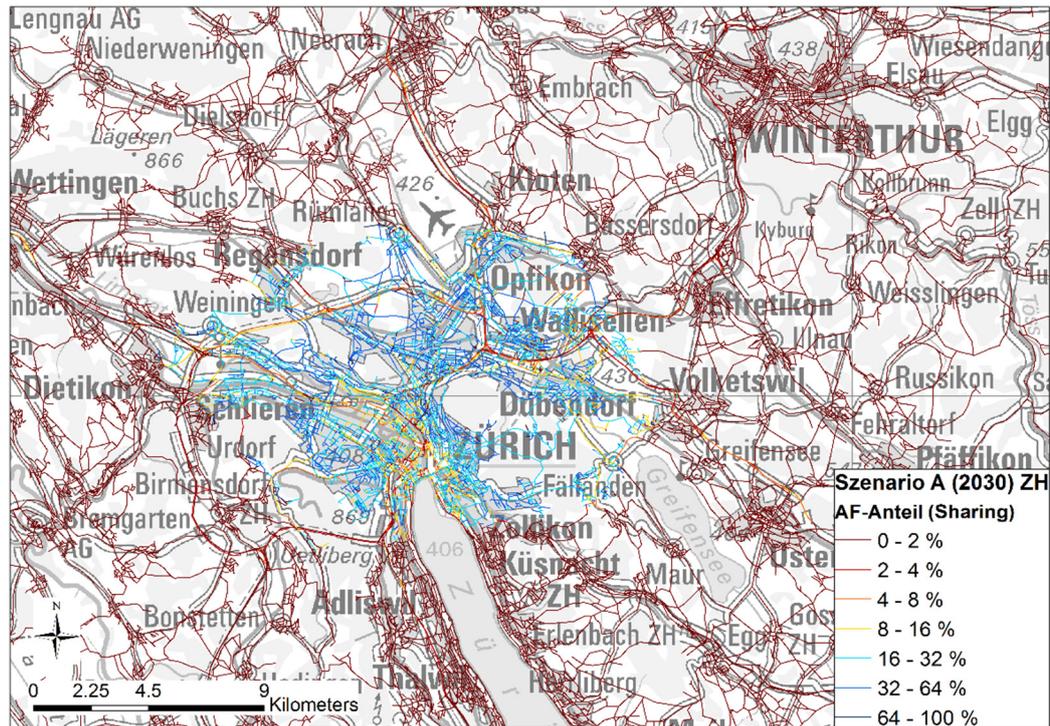
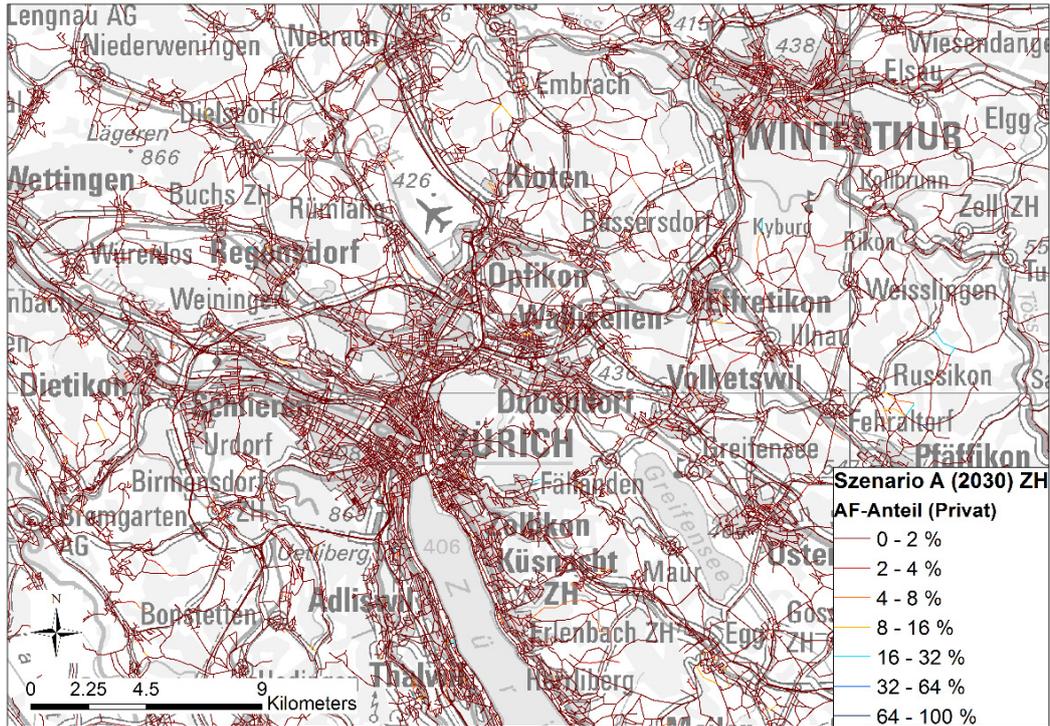


**Abb. 36** Übersicht MATSim-Modellgebiet des Teilraums Zürich

Durch die Überlagerung der Fahrten der privaten AF und der Sharing-AF wird im Teilraum Zürich bereits 2030 ein relativ hoher AF-Anteil im Stadtgebiet erreicht (AF-Anteil bis 64 % in beiden Szenarien). Der hohe Anteil an Sharing-AF im Jahr 2030 ist mit 15'000 Fahrzeugen in MATSim in beiden Szenarien bereits sehr hoch, was zu einem hohen AF-Anteil im Netz führt. Das Flottenmodell weist 2030 hingegen einen deutlich geringeren Sharing-Anteil in beiden Szenarien auf. Beide Nutzungsformen besitzen lediglich jeweils einen Anteil von je ca. 1 % an der Gesamtflotte (vgl. dazu auch Kapitel 4.4 und die entsprechenden Erklärungen).

### AF-Anteile (Privat und Sharing) im Teilraum ZH

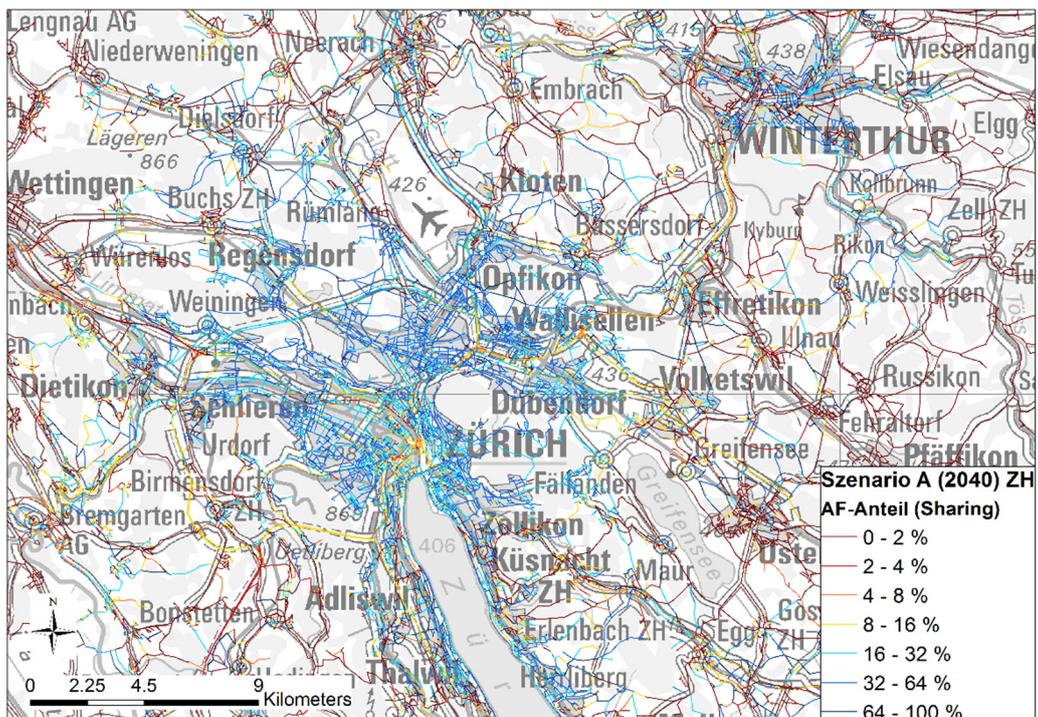
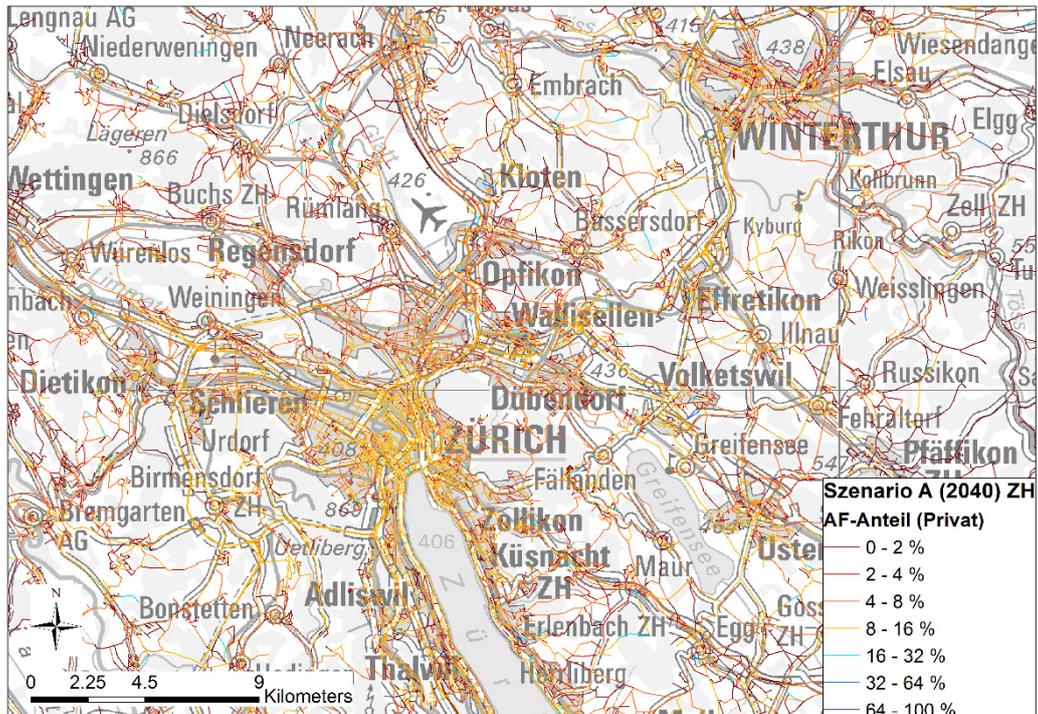
Im Unterschied zum gesamtschweizerischen Szenario zeigt sich im Teilraum Zürich auch deutlich die räumliche Einschränkung der Sharing-AF, da diese nur im Stadtgebiet von Zürich fahren (vgl. dazu auch Kapitel 5.2.1 zur zeitlich gestaffelten Strassenfreigabe). Die modelltechnische Umsetzung und die Unterschiede in MATSim zwischen dem gesamtschweizerischen Szenario und den modellierten Teilräumen befinden sich in der Schlussdokumentation des TP2. Die folgenden Abbildungen zeigen die AF-Anteile für private AF und Sharing-AF im Jahr 2030 (Szenario A). Die Ergebnisse des Szenarios B weisen vergleichbare Verteilungen auf und sind im Anhang des Forschungsberichts dokumentiert.



**Abb. 37** Anteil automatisierter Fahrzeuge je Nutzungsform im Teilraum Zürich im Szenario A im Jahr 2030

Im Jahr 2040 findet in beiden Szenarien durch die erweiterte Strassenfreigabe eine räumliche Ausdehnung der AF-Nutzung statt. Darüber hinaus nimmt, wie im gesamtschweizerischen Szenario (vgl. Kapitel 6.1) und auch in der Fahrzeugflotte (vgl. Kapitel 4.4), der AF-Anteil im Netz insgesamt zu, wobei die AF-Anteile in der Stadt Zürich nach wie vor höher sind als in der Agglomeration, da die Sharing-AF vermutlich insbesondere für Fahrten mit Start und/oder Ziel in der Innenstadt genutzt werden und dort zu einem hohen Sharing-AF-Anteil führen. Strecken in der Agglomeration weisen einen geringeren Sharing-AF-Anteil

auf. Die Anteile der privaten AF im Netz sind im Gegensatz im gesamten Teilgebiet Zürich auf einem konstanten, aber im Vergleich zu den Sharing-AF auf einem niedrigeren Niveau. Die folgenden Karten zeigen die Verteilung der AF je Nutzungsform im Netz (Szenario A). Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Randbereiche des modellierten Teilraums in den folgenden Abbildungen einen sehr geringen AF-Anteil aufweisen. Dies ist ein Modelleffekt, da in den Randbereichen die Verkehrsbelastungen im Modell nicht mehr richtig abgebildet werden. Für die weitere Analyse werden diese Bereiche entsprechend nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse des Szenarios B zeigen ähnliche Effekte und sind im Anhang dokumentiert.

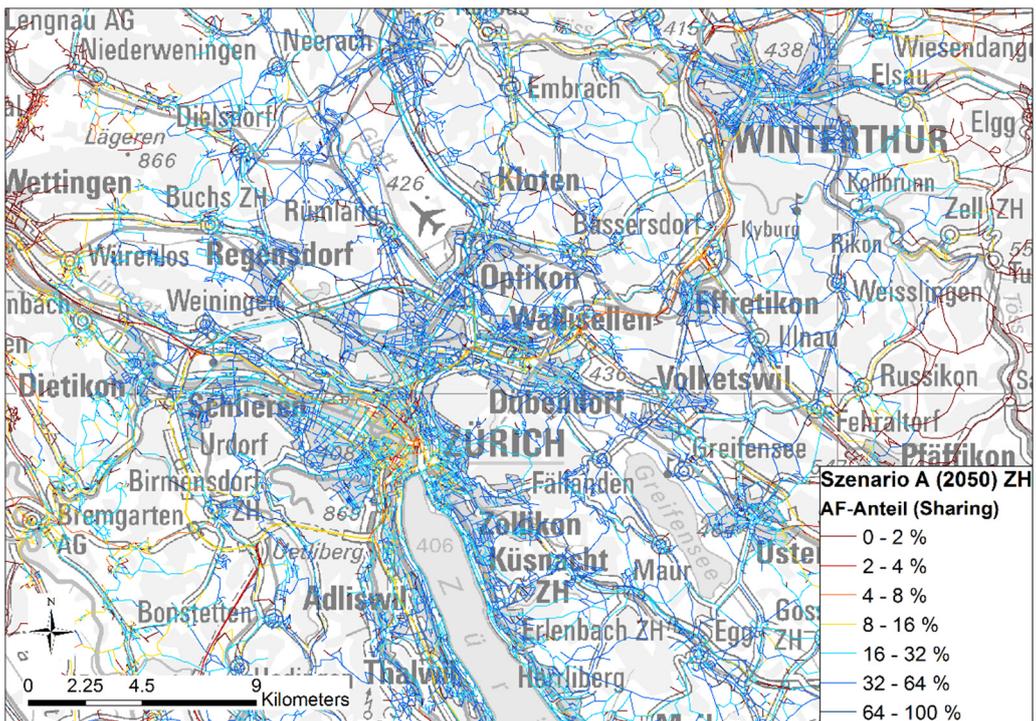
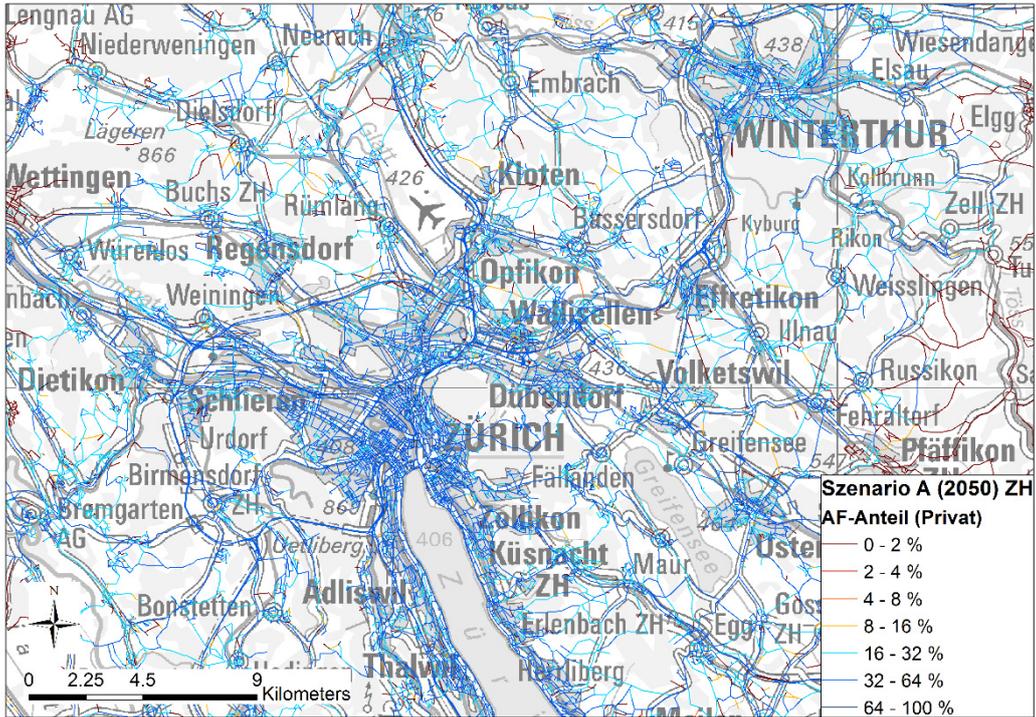


**Abb. 38** Anteil automatisierter Fahrzeuge je Nutzungsform im Teilraum Zürich im Szenario A im Jahr 2040

In der weiteren Entwicklung bis 2050 nimmt der AF-Anteil im Netz im gesamten Teilraum weiter zu und beträgt im Szenario A flächig über 32 %. Die Anteile im Szenario B sind aufgrund der grösseren AF-Flotte entsprechend höher. Es zeigt sich auch, dass 2050 das Lokalstrassennetz einen tendenziell höheren AF-Anteil als das HLS-Netz aufweist. Dies lässt sich ebenfalls mit der eher lokal orientierten Nutzung der Sharing-AF erklären.

Die Zunahme der AF-Anteile zwischen den Zeitschritten 2030 und 2040 bzw. 2040 und 2050 ist im Szenario A bei den Sharing-AF eher gering. Dies lässt sich auch mit der wenig wachsenden Flottengrösse (vgl. dazu auch Kapitel 4.4) erklären. Im Gegensatz dazu nimmt der AF-Anteil der privaten Fahrzeuge in den betrachteten Zeiträumen deutlich zu, was dazu führt, dass der Anteil privater AF 2050 im Gegensatz zu 2030 den grösseren Anteil an der gesamten AF-Belastung im Netz ausmacht. Es zeigt sich auch, dass private AF vermehrt in der Innenstadt, auf der HLS und in ländlicheren Bereichen der Agglomeration unterwegs sind, wo hingegen die Sharing-AF einen hohen Anteil in den Gemeinden der Agglomeration und der Stadt Zürich (ohne Innenstadt) ausmachen.

Die folgenden Karten zeigen die Verteilung der AF je Nutzungsform im Netz (Szenario A). Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Randbereiche des modellierten Teilraums in den folgenden Abbildungen einen sehr geringen AF-Anteil aufweisen. Dies ist ein Modelleffekt, da in den Randbereichen die Verkehrsbelastungen im Modell nicht mehr richtig abgebildet werden. Für die weitere Analyse werden diese Bereiche entsprechend nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse des Szenarios B zeigen ähnliche Effekte und sind im Anhang dokumentiert.



**Abb. 39** Anteil automatisierter Fahrzeuge je Nutzungsform im Teilraum Zürich im Szenario A im Jahr 2050

## Vergleich und Entwicklung der AF-Flottengrößen in MATSim und im Flottenmodell

Im Szenario B wächst die Sharing-Flotte gemäss Flottenmodell TP5 deutlich stärker als im Szenario A. Dieser Effekt ist in MATSim in der Tendenz auch berücksichtigt, aber nicht so stark ausgeprägt wie im Flottenmodell. Grundsätzlich zeigt sich, dass die beiden verwendeten Modelle (Flottenmodell TP5 und MATSim-Modell TP2) unterschiedliche Annahmen und Ansätze bzgl. der Flottengrösse der Sharing-Fahrzeuge verwenden. Zum einen liegt das an dem unterschiedlichen Modellierungssperimeter (Flottenmodell: CH; MATSim: ZH) und zum anderen an der gegebenen Fragestellung (TP5: Abbildung von möglichen Migrationsszenarien; TP2: Berechnung einer aus wirtschaftlicher Sicht optimalen Flottengrösse). Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die jeweiligen Ergebnisse bzgl. der Sharing-Flotte in beiden Modellen. Im Rahmen der Synthesearbeiten des TP1 und der finalen MATSim Berechnungen des TP2 gilt es zu klären, wie mit den unten dargestellten Abweichungen umgegangen werden soll.

**Tab. 22** Übersicht der Flottenentwicklung in den Szenarien und Zeitschritten je Angebotsform

Vergleich Flottengrösse AF		2030	2040	2050
Szenario A	Sharing-AF MATSim	15'000 (ZH)	20'000 (ZH)	40'000 (ZH)
	Sharing-AF Flottenmodell	3'100 (CH)	28'500 (CH)	52'500 (CH)
Szenario B	Sharing-AF MATSim	15'000 (ZH)	30'000 (ZH)	60'000 (ZH)
	Sharing-AF Flottenmodell	24'600 (CH)	228'100 (CH)	419'700 (CH)

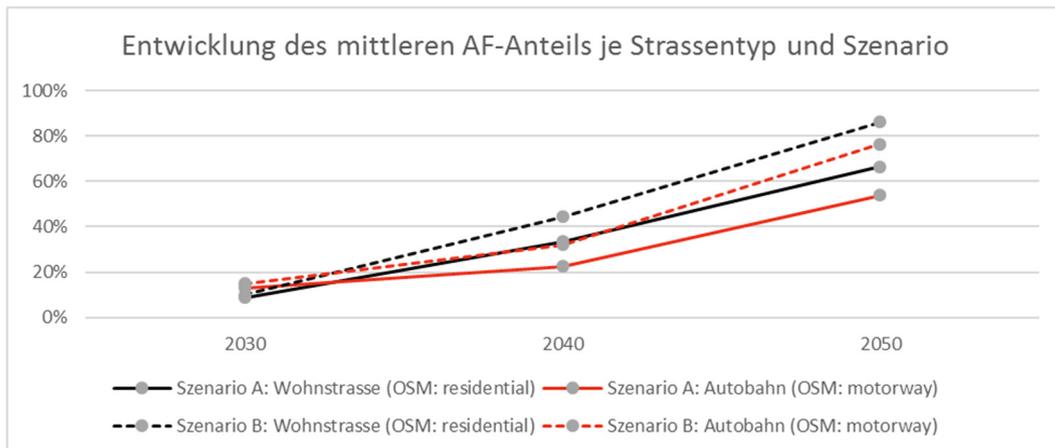
Betrachtet man die Modellergebnisse des Teilraums Zürich auf Quartierebene und vergleicht dort die Entwicklung der AF-Anteile auf den unterschiedlichen Strassen in den drei Zeitschritten zeigen sich grundsätzlich vergleichbare Entwicklungen wie auf der übergeordneten Betrachtungsebene. 2030 sind die AF-Anteile auf allen Strassen gering und 2050 flächig deutlich gestiegen. Interessant ist der Zwischenzustand 2040, da sich die AF-Anteile in diesem für die einzelnen Quartierstrassen unterscheiden. Dadurch stellt sich die Frage nach einem möglichen Muster oder einem kausalen Zusammenhang zwischen z.B. Strassentyp, Nutzungen entlang der Strasse oder Funktion der Strasse auf mikroskopischer Ebene und dem erreichten AF-Anteil (Unterscheidung privates AF oder Sharing-AF). Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts lässt sich kein eindeutiges Muster erkennen, aber insbesondere in Hinblick auf die detaillierte Ausgestaltung/Umgestaltung jeder einzelnen Strasse aufgrund AF (insbesondere im Mischverkehr), wäre es interessant etwaige Zusammenhänge zu erkennen, um mit Massnahmen (baulicher oder regulatorischer Art) gezielt darauf reagieren zu können bzw. die Reihenfolge der möglichen Massnahmen auf einzelnen Streckenabschnitten zu priorisieren. Das beschriebene Themenfeld und die damit verbundenen Fragestellungen bieten ein grosses Potenzial für weitere Forschungen (vgl. dazu auch Kapitel 8.1 und Kapitel 9).

### 6.3 Strassendifferenzierte Auswertung der Durchdringung mit Fokus auf den Teilraum Zürich

Ergänzend zu den raumdifferenzierten Auswertungen werden im Folgenden auch die AF-Anteile und Fahrleistungen der AF je Strassentyp analysiert. Dabei wird insbesondere auf die zeitliche Entwicklung der beiden Kenngrößen über die Zeitschritte 2030, 2040, 2050 und die Unterschiede zwischen den beiden Szenarien A und B eingegangen. Die Auswertung basiert auf den Tagesbelastungen aus MATSim. Die Analysen fokussieren auf den Teilraum Zürich und die beiden Strassentypen Wohnstrasse (OSM-Type: «residential») und Autobahn (OSM-Typ: motorway). Die beiden ausgewählten Strassentypen bilden die beiden Extremformen bzgl. Ausbaustandard, Geschwindigkeit und Kapazität. Dadurch können mögliche Unterschiede und Abweichungen am besten aufgezeigt werden. In Bezug auf die in Kapitel 7.2 beschriebenen Pilotstrassen ist die Scheuchzerstrasse eine Beispielstrecke für eine Wohnstrasse und der HLS-Abschnitt Urdorf Nord ein Beispiel für eine Autobahn. Die folgenden Auswertungen behandeln nur einen Teil der Fragestellungen des TP5. Aus diesem Grund können nur erste Ergebnisse gezeigt und keine detaillierten Auswertungen durchgeführt werden. Das Themenfeld der AF-Durchdringung je Strassentyp bietet jedoch ein grosses Forschungspotenzial und sollte in weiterführenden Untersuchungen vertieft analysiert werden.

#### Anteile AF je Strassentyp

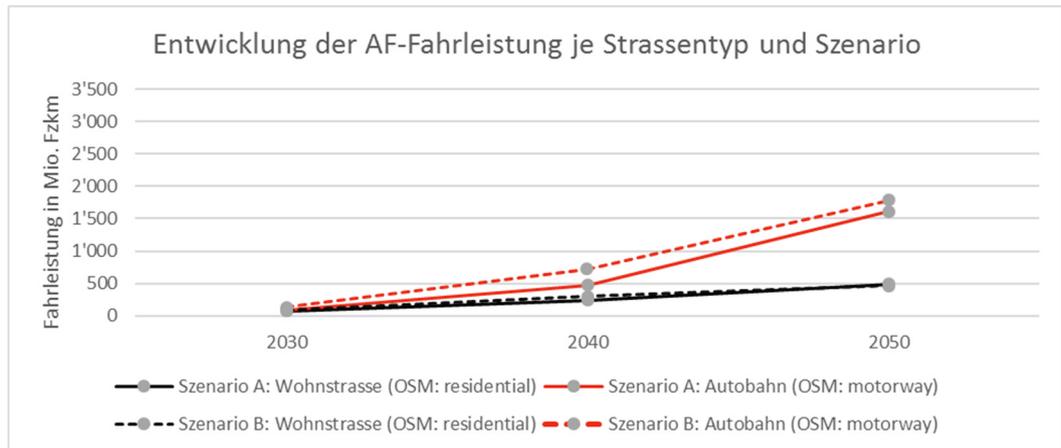
Die Auswertung der Entwicklung des mittleren AF-Anteils auf den beiden genannten Strassentypen bestätigt die in Kapitel 6.2 gewonnenen Erkenntnisse. In beiden Szenarien nimmt der AF-Anteil mit der Zeit zu, wobei die Anteile im Szenario B höher sind als im Szenario A. Es zeigt sich, dass die städtischen Strassen (gilt nicht nur für OSM-Typ «residential») in allen Zeitschritten einen höheren AF-Anteil aufweisen, als die Autobahn. Eine mögliche Erklärung ist die verstärkte Nutzung der AF (insbesondere der Sharing-AF) auf kurzen Wegen in der Agglomeration, bei welchen die Autobahn nicht genutzt wird. Ab 2040 steigt der AF-Anteil auf der Autobahn stärker an. Dies liegt vermutlich daran, dass dann auch die private AF-Flotte stärker zunimmt und die Angebotsform eine verstärkte Autobahnnutzung verursacht. Die beschriebenen Ergebnisse und Entwicklungen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abb. 40** Entwicklung des mittleren AF-Anteils im Teilraum Zürich

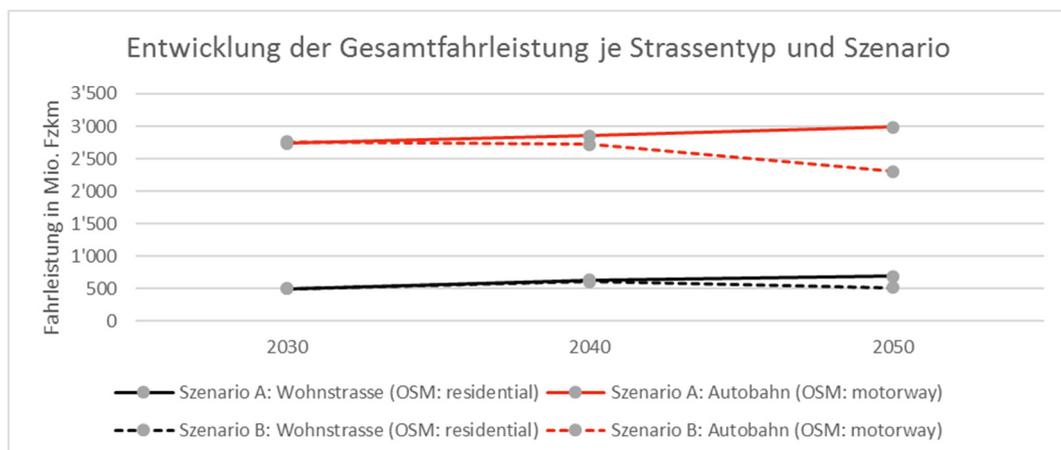
## Fahrleistung je Strassentyp

Die zuvor erkannten Effekte der AF-Flottenzunahme und der Entwicklung der AF-Anteile zeigt sich auch bei Betrachtung der AF-Fahrleistung. Die Summe der AF-Fahrleistung auf den beiden Strassentypen steigt über die Zeit entsprechend an. Auffällig ist dabei die hohe Zunahme auf der Autobahn, insbesondere ab 2040, was aber mit der Flotte und den AF-Anteilen im Netz korrespondiert. Die Fahrleistung der AF auf den Wohnstrassen nimmt absolut nur geringfügig zu, weist aber relativ gesehen eine Verdopplung der Fahrzeugkilometer auf. Die beschriebenen Ergebnisse und Entwicklungen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abb. 41** Entwicklung der AF-Fahrleistung im Teilraum Zürich

Betrachtet man neben der reinen AF-Fahrleistung auch die Gesamtfahrleistung (AF und konventionelle PW) zeigt sich ein anderer Trend. Die Gesamtfahrleistung bleibt im Gegensatz zur AF-Fahrleistung über die Zeit nahezu konstant bzw. nimmt in Szenario B insbesondere auf der Autobahn sogar ab. Dies belegt, dass im Gegensatz zur Fahrleistung von AF die Fahrleistung der konventionellen Fahrzeuge zurückgeht. Dies ist in Bezug auf die Entwicklung der Flottengrösse und die AF-Durchdringung nicht überraschend und bestätigt die erwartete Entwicklung. Insbesondere im Szenario B führt die sinkende Flottengrösse zu einer Reduktion der gefahrenen Fahrzeugkilometer. Die in der folgenden Abbildung beispielhaft dargestellten Ergebnisse für zwei Strassentypen zeigt sich so auch für das gesamte Netz (vgl. dazu auch Kapitel 6.2). Die Reduktion der Fahrleistung auf der Autobahn wird sich u.U. auch positiv auf vorhandene Engpässe auswirken (vgl. dazu den Schlussbericht des TP2).



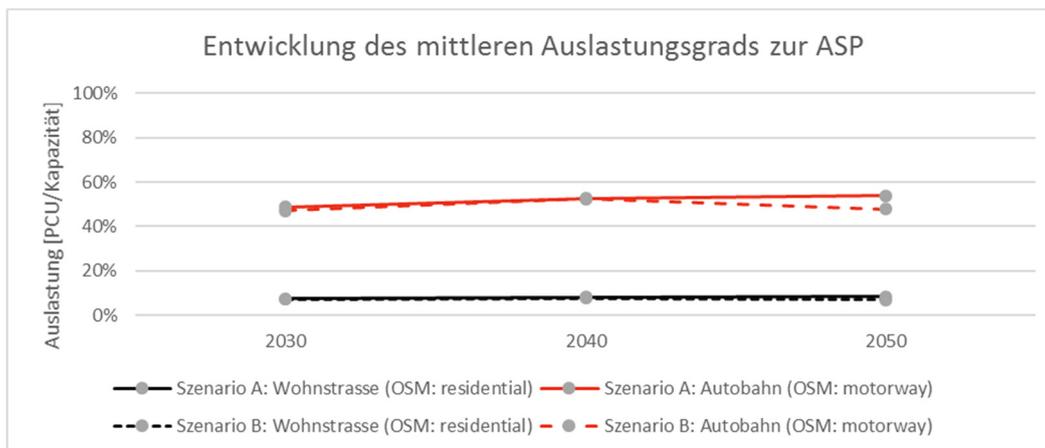
**Abb. 42** Entwicklung der Gesamtfahrleistung im Teilraum Zürich

## Auslastungsgrad je Strassentyp

Im Zusammenhang mit dem teilweise festgestellten Rückgang der Fahrleistung wird auch der mittlere Auslastungsgrad auf den beiden beispielhaft ausgewählten Strassentypen ausgewertet. Dabei wird im Gegensatz zu dem vorgängig betrachteten Tagesverkehr die Abendspitzenstunde (ASP) ausgewertet. Zudem werden zur Berechnung des Auslastungsgrads nicht die Anzahl Fahrzeuge, sondern die PCU als Basis verwendet (vgl. dazu auch Kapitel 5.3). Bei den Auswertungen werden ausserdem Strecken, die eine Belastung von weniger als 50 Fz/Tag aufweisen, nicht berücksichtigt, da diese quasi keine Belastung aufweisen und den Mittelwert der belasteten Strecken verfälschen würden.

Die Entwicklung des mittleren Auslastungsgrads über die Zeit ist nahezu konstant und unabhängig vom gewählten Szenario. Die dargestellten mittleren Auslastungsgrade von 40 % bis 60 % sind relativ gering, trotzdem können lokale Engpässe auftreten (vgl. dazu die Engpassanalyse des TP2). Im Szenario B ist auf der Autobahn ein leichter Rückgang des mittleren Auslastungsgrads im Jahr 2050 festzustellen, was sich mit den Entwicklungen bzgl. der Gesamtfahrleistung deckt. Auffällig bei der Auswertung des Auslastungsgrads ist auch der deutlich höhere Auslastungsgrad auf der Autobahn. Dies ist jedoch mit den kapazitätslimitierenden Knotenpunkten auf den städtischen Strassen zu erklären, sodass dort die Streckenkapazität quasi nicht erreicht wird. Auf der Autobahn ist jedoch die Streckenkapazität unter Berücksichtigung der Verflechtungen im Ein- und Ausfahrtsbereich das limitierende Element, sodass dort grössere Auslastungen erreicht werden.

Der Auslastungsgrad der Infrastruktur spielt auch im Zusammenhang mit der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems eine wichtige Rolle (vgl. dazu Kapitel 7.4). Vertiefende Auswertungen zu Kapazitätsfragen im Zusammenhang mit der Engpassanalyse werden im Schlussbericht des TP2 behandelt.



**Abb. 43** Entwicklung des mittleren Auslastungsgrads zur ASP im Teilraum Zürich



## 7 Analyse der besonderen Herausforderungen und Lösungsvorschläge

Die beiden Schwerpunktthemen des TP5 sind die Analyse der Auswirkungen des Mischverkehrs auf die Sicherheit und die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems. In diesem Zusammenhang beschreibt der Mischverkehr sowohl das Aufeinandertreffen von konventionellen («konventionell gesteuerten») und automatisierten Fahrzeugen, als auch die Begegnung von anderen nicht motorisierten Verkehrsteilnehmern (z.B. Fussgänger und Velofahrer) mit automatisierten Fahrzeugen. Um die aus dem Mischverkehr resultierenden Herausforderungen zu analysieren, werden nach der im Folgenden beschriebenen Methodik Beispielstrecken ausgewählt, die exemplarisch analysiert werden. Zudem werden, basierend auf den unterschiedlichen Strassentypen, allgemeinere Aussagen in Bezug auf die Entwicklung von Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems bis 2050 in Abhängigkeit der Szenarien getroffen.

### 7.1 Auswahl von Beispielstrecken

Bei der Auswahl der Beispielstrecken für die vertiefte Analyse findet eine Fokussierung auf die Stadt und die Agglomeration Zürich statt, da zum einen ein MATSim-Modell für diese Region vorliegt und zum anderen eine gute Datenverfügbarkeit für ergänzende verkehrliche Kenngrössen besteht. Bei der Streckenauswahl werden die drei Strassentypen HLS, HVS (ausserorts) und städtische Strassen (ES, SS, HVS innerorts) unterschieden (vgl. dazu auch Kapitel 5). Dies führt zu einer möglichst breiten Abdeckung der gängigsten Verkehrssituationen und verfolgt das Ziel, möglichst viele unterschiedliche Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Mischverkehr auswerten zu können. Aus den oben beschriebenen Gründen werden die folgenden Strecken gewählt:

- **HLS-Strecken**
  - Autobahn A1: AS Dietikon bis Verzweigung Limmattal (Typ 2x3 bzw. 2x4 Fahrstreifen)
  - Autobahn A3: Abschnitt Anschlussstelle (AS) Urdorf-Nord (Typ 2x2 Fahrstreifen)
- **HVS-Strecken ausserorts**
  - Hitnau - Saland (Typ HVS mit Verbindungsfunktion)
  - Gibswil - Fischental (Typ HVS mit Verbindungsfunktion)
- **Städtische Strecken**
  - Seefeldstrasse (Typ Sammelstrasse mit Tram im Mischbetrieb)
  - Scheuchzerstrasse (Typ Erschliessungsstrasse)
  - Talstrasse (Typ Verbindungsstrasse)
  - Wallisellerstrasse (Typ Sammelstrasse mit Bus, Fahrbahnhaltstellen und Velostreifen)
  - Alfred Escher-Strasse (Typ HVS innerorts mit 2x1 Fahrstreifen und Längsparkierung)
  - General-Guisan Quai (Typ HVS innerorts mit 2x Fahrstreifen und Längsparkierung)
  - Badenerstrasse (Typ Sammelstrasse mit Tram in Mittellage und Eigentrasse)
  - Pfingstweidstrasse (Typ HVS innerorts mit 2x2 Fahrstreifen und Tram im Mischbetrieb)

Die genannten Beispielstrecken sind die der folgenden Abbildung auch räumlich verortet.

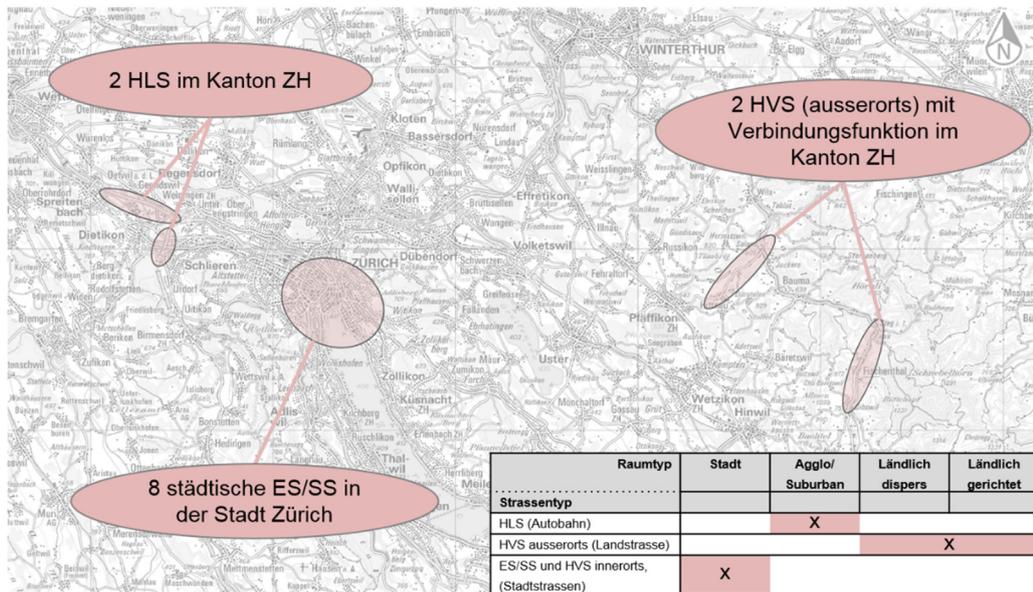


Abb. 44 Übersicht Auswahl Strassentypen

Für alle genannten Beispielstrassen wurde im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts ein sog. Steckbrief erstellt, der die wichtigsten Charakteristika und die verfügbaren verkehrlichen Kenngrößen zusammenfasst. Ausgewählte Steckbriefe werden im nächsten Abschnitt dargestellt und beschrieben. Die weiteren Steckbriefe befinden sich im Anhang des Forschungsberichts.

Bereits die Menge der ausgewählten Beispielstrassen je Streckentyp zeigt, dass die Verkehrssituation im städtischen Gebiet sehr vielseitig ist und sich auch die Anforderungen der einzelnen städtischen Strassen deutlich unterscheiden. Aufgrund dieser Tatsache und auch im Zusammenhang mit den begrenzten zeitlichen und finanziellen Ressourcen erfolgt unter Berücksichtigung der verfügbaren Datenlage (Verkehrs- und Unfalldaten) eine Konzentration auf drei ausgewählte Strassen, die dann in Form von Pilotstrassen vertieft im Hinblick auf die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems analysiert werden. Diese sind die

- Autobahn A3 (Abschnitt Anschlussstelle Urdorf-Nord),
- Seefeldstrasse
- Scheuchzerstrasse

## 7.2 Beschreibung der Beispierräume und Strassen

Im Folgenden werden die drei definierten Pilotstrassen kurz anhand der erstellten Steckbriefe vorgestellt und mithilfe einer Fotodokumentation beschrieben.

### Seefeldstrasse

Die Seefeldstrasse ist eine Sammelstrasse am östlichen Ufer des Zürichsees. Neben dem MIV wird die Strasse auch durch Tramverkehr im Mischbetrieb und Langsamverkehr genutzt. Die primären Nutzungen an der Seefeldstrasse sind Wohnen, Arbeiten und Einkaufen (vgl. dazu auch den folgenden Steckbrief). Es handelt sich somit um eine Strasse mit einem hohen Grad an unterschiedlichen verkehrlichen Anforderungen und betrieblichen Herausforderungen.



Abb. 45 Steckbrief der Pilotstrecke Seefeldstrasse

Aus verkehrlicher Sicht sind die folgenden Aspekte in der Seefeldstrasse besonders relevant:

- Parkierung längs der Fahrbahn und die Erschliessung von (privaten) Einstellhallen
- Anbindung angrenzender Strassen zur Erschliessung der umliegenden Wohnquartiere
- Anlieferung sowie Ver- und Entsorgungsfahrten über die Seefeldstrasse
- Fahrbahn- und Kombihaltestellen für den ÖV (Bus und Tram) und dessen Führung im Mischbetrieb
- Fussgängerführungen längs und quer zur Erschliessung der Randnutzungen
- Veloverkehr im Mischbetrieb mit dem ÖV und dem MIV

Die gelisteten verkehrlichen Besonderheiten der Seefeldstrasse sind in der folgenden Abbildung beispielhaft dargestellt.

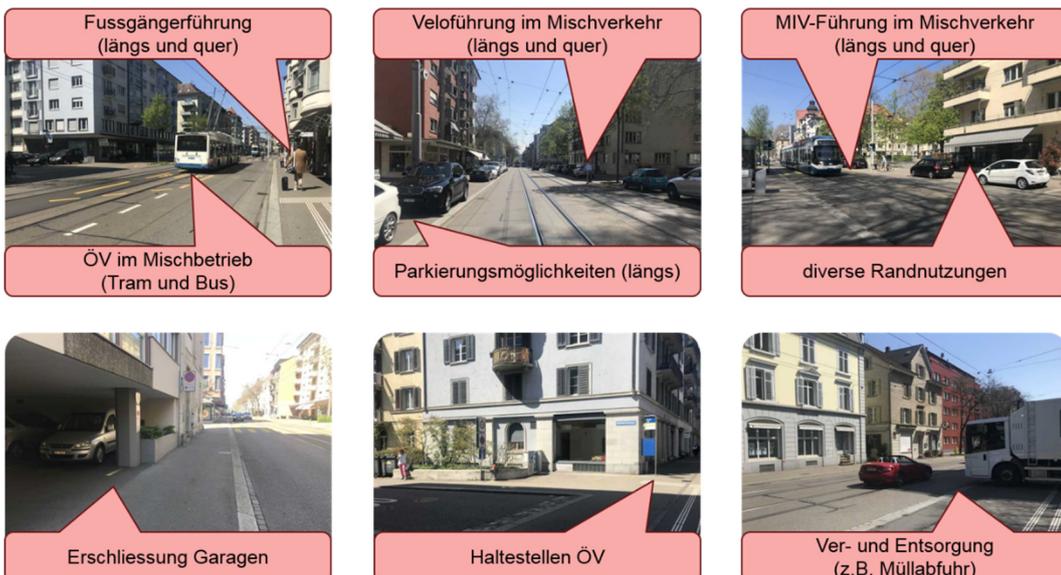


Abb. 46 Übersicht der verkehrlichen Besonderheiten in der Seefeldstrasse

### Scheuchzerstrasse

Die Scheuchzerstrasse ist eine Erschliessungsstrasse und befindet sich nördlich des Züricher Hauptbahnhofs und östlich der Limmat. Neben dem MIV wird die Strasse auch sehr stark vom Langsamverkehr genutzt (auf dieser Strasse verläuft die direkte Veloroute von der Uni Zürich-Zentrum zum Uni-Standort Irchel). Die vorherrschende Nutzung im Umfeld der Strasse ist Wohnen (vgl. dazu auch den folgenden Steckbrief).



Abb. 47 Steckbrief der Pilotstrecke Scheuchzerstrasse

Aus verkehrlicher Sicht sind die folgenden Aspekte in der Scheuchzerstrasse besonders relevant:

- Parkierung längs und auf der Fahrbahn und die Erschliessung von privaten Einstellhallen
- Reduzierte Temporegime (T30)
- Verknüpfungen zu Quartierstrasse
- Querungsmöglichkeiten für Fussgänger
- Velorouten längs der Fahrbahn (Mischverkehr) und insbesondere auch im Gegenverkehr von Einbahnabschnitten

Die gelisteten verkehrlichen Besonderheiten der Scheuchzerstrasse sind in der folgenden Abbildung beispielhaft dargestellt.



Abb. 48 Übersicht der verkehrlichen Besonderheiten in der Scheuchzerstrasse

### Autobahn A3 (Abschnitt Anschlussstelle Urdorf-Nord)

Die Autobahn A3 im Bereich der Anschlussstelle Urdorf-Nord ist ein Teil des HLS-West-rings um die Stadt Zürich und auf 2x2 Fahrstreifen ausgebaut. Der Abschnitt stellt somit ein zentrales Element des HLS-Netzes der Region Zürich und auch der gesamten Schweiz mit entsprechend hohen MIV-Belastungen (vgl. auch den folgenden Steckbrief) dar.

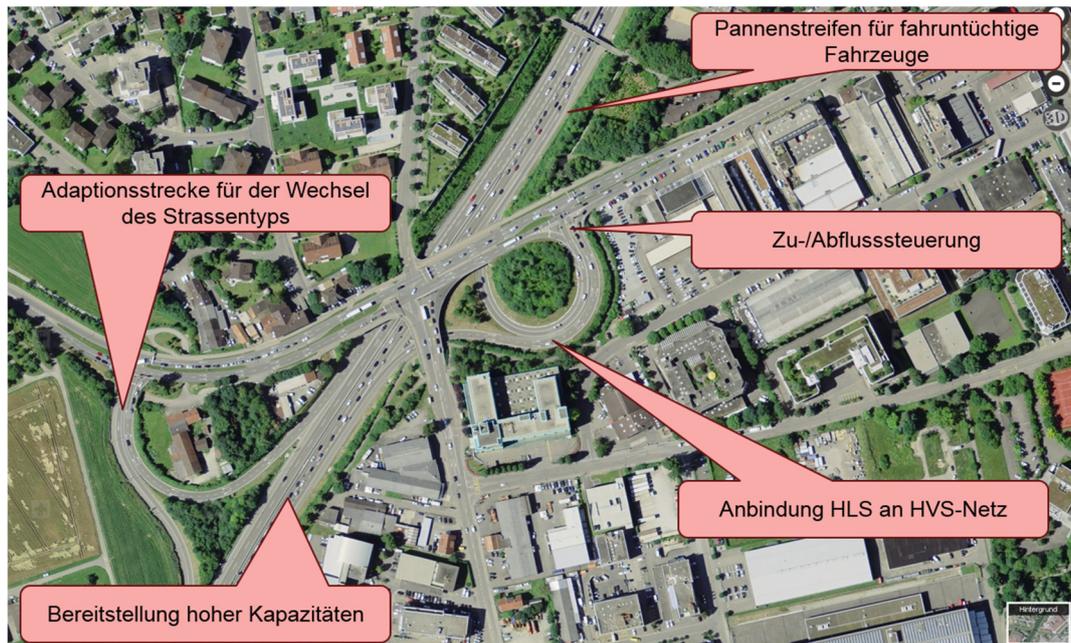


Abb. 49 Steckbrief der Pilotstrecke im Bereich des HLS-Anschlusses Urdorf-Nord

Aus verkehrlicher Sicht sind die folgenden Aspekte auf der HLS besonders relevant:

- Regelung des Betriebsablaufs auf den Adaptionstrecken zwischen HLS und HVS und die Verknüpfung der beiden Strassennetze
- Freihaltung und zweckgerichtete Nutzung des Pannestreifens für z.B. fahruntüchtige Fahrzeuge
- Bereitstellung ausreichend hoher Kapazitäten für den MIV
- Zu-/Abflusssteuerung und Verkehrsmanagement (VM) im Bereich der Anschlussstelle

Die gelisteten verkehrlichen Besonderheiten im HLS-Bereich der Anschlussstelle Urdorf-Nord sind in der folgenden Abbildung beispielhaft dargestellt.



**Abb. 50** Übersicht der verkehrlichen Besonderheiten im Bereich Urdorf-Nord

Aufbauend auf den beschriebenen Charakteristika der drei Streckenabschnitte und deren Besonderheiten werden in den folgenden Abschnitten beispielhaft die Herausforderungen im Mischverkehr bzgl. Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems und daraus resultierende Lösungsverschlüsse erläutert.

### 7.3 Sicherheit im Mischverkehr

Automatisierte Fahrzeuge können die Sicherheit des Verkehrs beeinflussen. Insbesondere wird häufig prognostiziert, dass Unfälle, die durch das Fehlverhalten von menschlichen Fahrern entstehen, vermieden werden können. Andererseits ist es auch denkbar, dass einige Arten von Unfällen vermehrt entstehen oder gar ganz neue Unfälle, durch automatisierte Fahrzeuge verursacht werden könnten. In Bezug auf die Infrastruktur ist es möglich, dass andere Anforderungen durch die neue Fahrzeugtechnologie an die Strassengestaltung formuliert werden müssen. Zur Analyse der Auswirkungen von automatisiertem Fahren auf die Sicherheit im Verkehr auf Schweizer Strassen, werden in den folgenden Abschnitten die beiden Aspekte Unfallvermeidung durch Automatisierung und Unfallentstehung durch Automatisierung betrachtet.

Eine grundsätzliche Problematik besteht darin, dass aktuell die exakte Leistungsfähigkeit und insbesondere Fehleranfälligkeit der komplexen Systemtechnik (Sensorik, Verarbeitung, Aktorik) von Level 4- (und Level 5) Fahrzeugen nur extrem vereinfacht angenommen werden kann. Die bisherigen Erfahrungen in der Entwicklung von einfachen Assistenzsystemen lassen jedoch noch sehr umfangreiche und lange Lernphasen der Hersteller erwarten bis zur Erreichung des gewünschten/erwarteten hohen Sicherheitsgewinns durch die ausfallsichere, intelligente und dem menschlichen Fahrer tatsächlich überlegene Technik der Roboterfahrzeuge.

Als besondere Herausforderung mit noch nicht abschätzbarem, ab sicher sehr hohem Forschungs- und Entwicklungsaufwand zeichnet sich bereits heute die Abstimmung zwischen Mensch (als Fahrer, Fussgänger etc.) und Maschine (dem intelligenten Roboterfahrzeug) ab. Der insbesondere in zukünftigen urbanen, hochkomplexen Mischungsszenarien aus unterschiedlichsten Verkehrsmodi, automatischen und humanen Verhaltensweisen in wechselnden Infrastrukturen entstehende vieldimensionale «Handlungsraum» der Mobilität ist vermutlich eine langfristige Daueraufgabe.

### 7.3.1 Methodik und Vorgehen

Methodisch wird die Abschätzung der Sicherheitswirkungen automatisierter Fahrzeuge wie folgt abgehandelt. Zunächst werden historische Daten zu den Unfällen auf Schweizer Strassen analysiert. Diese sind aus öffentlichen Quellen verfügbar und können für verschiedene Strassentypen, Fahrzeugtypen, Unfalltypen und weitere Eigenschaften separat analysiert werden. Im darauffolgenden Schritt werden Annahmen zur Automatisierung der Fahrzeuge getroffen. Somit kann für jeden Unfalltyp über die Ursachen, die zum Unfall geführt haben, abgeschätzt werden, ob diese Unfälle durch automatisierte Fahrzeuge hätten verhindert werden können. Diese Analyse geschieht getrennt für die Fahrzeug- und Strassentypen. Auch Betrachtungen bzgl. Unfallursachen, die durch die Automatisierung vermehrt auftreten können, werden angestellt. Als Ergebnis können Empfehlungen für Massnahmen abgeleitet werden, sodass Massnahmen ergriffen werden können, damit der Mischverkehr aus automatisierten und konventionellen Fahrzeugen möglichst sicherer wird.

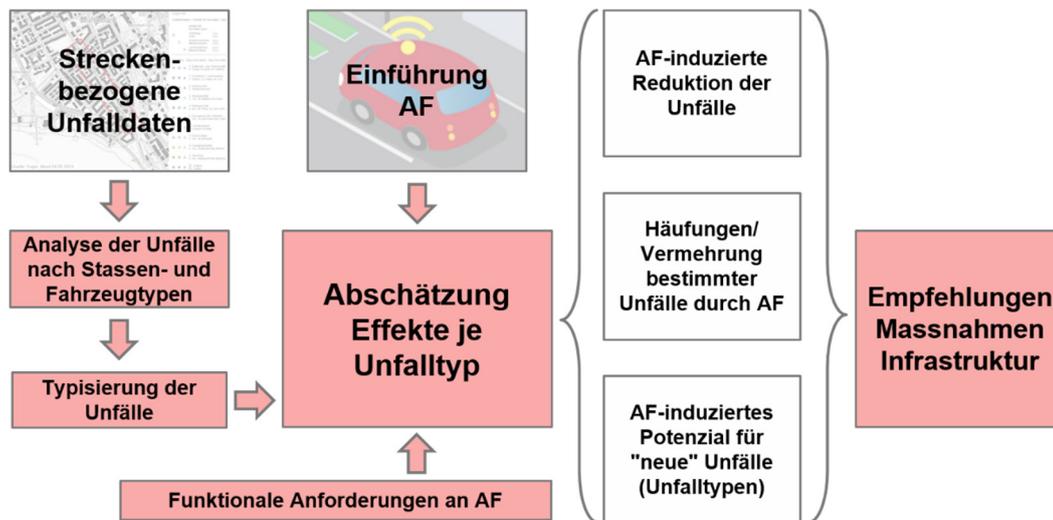
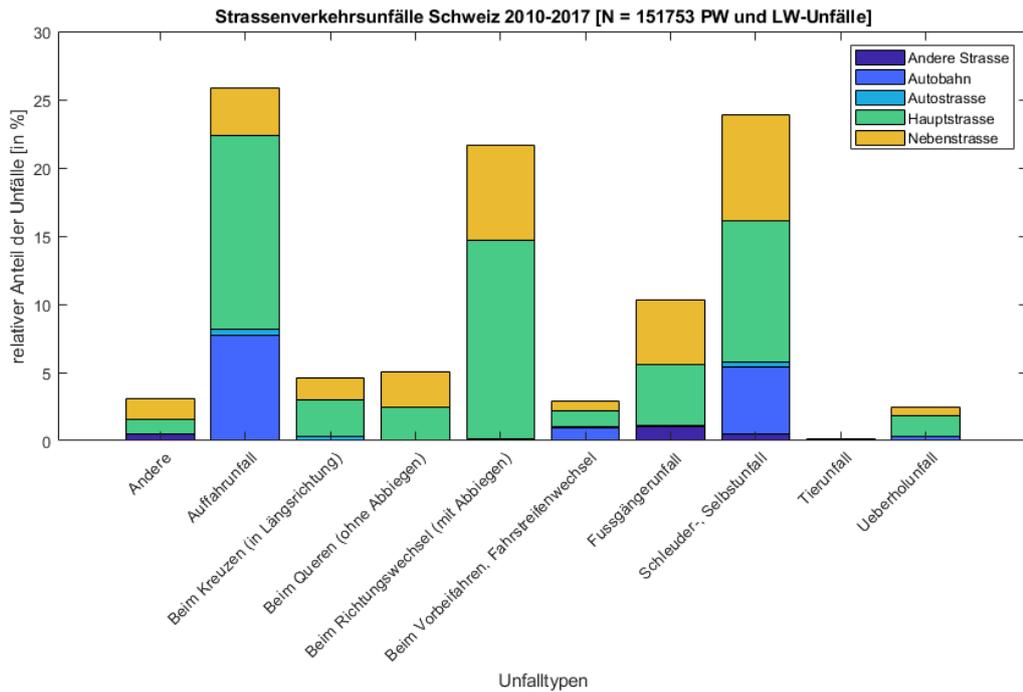


Abb. 51 Übersicht Methodik zur Auswertung der Sicherheitseffekte durch AF

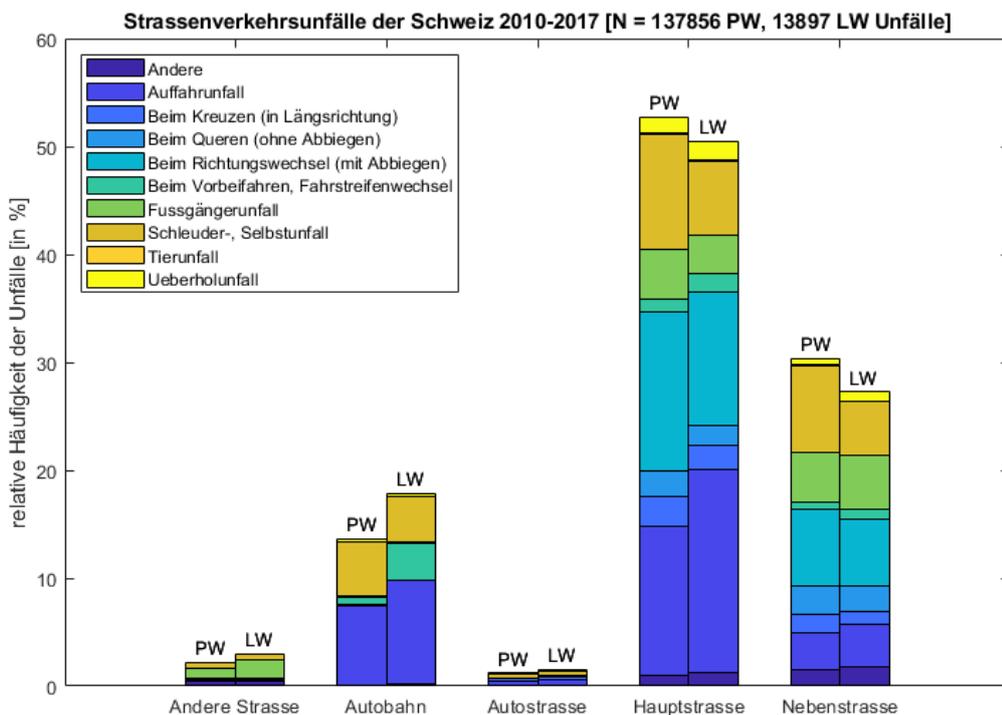
### 7.3.2 Analyse und Typisierung der Unfälle

Die öffentlich verfügbaren Daten umfassen Unfälle mit Personenschaden in der gesamten Schweiz, unterteilt nach unterschiedlichen Merkmalen der Unfälle. Von besonderem Interesse sind hierbei die Konfliktsituationen, die zu einem Unfall führten. Diese werden durch die Unfalltypen ausgedrückt. Die Abb. 52 beinhaltet die Strassenverkehrsunfälle der Schweiz der Jahre 2010 bis 2017, unterteilt in die zehn vordefinierten Unfalltypen. Ausserdem wird hieraus ersichtlich, auf welchen Strassentypen die jeweiligen Unfalltypen vermehrt auftraten.



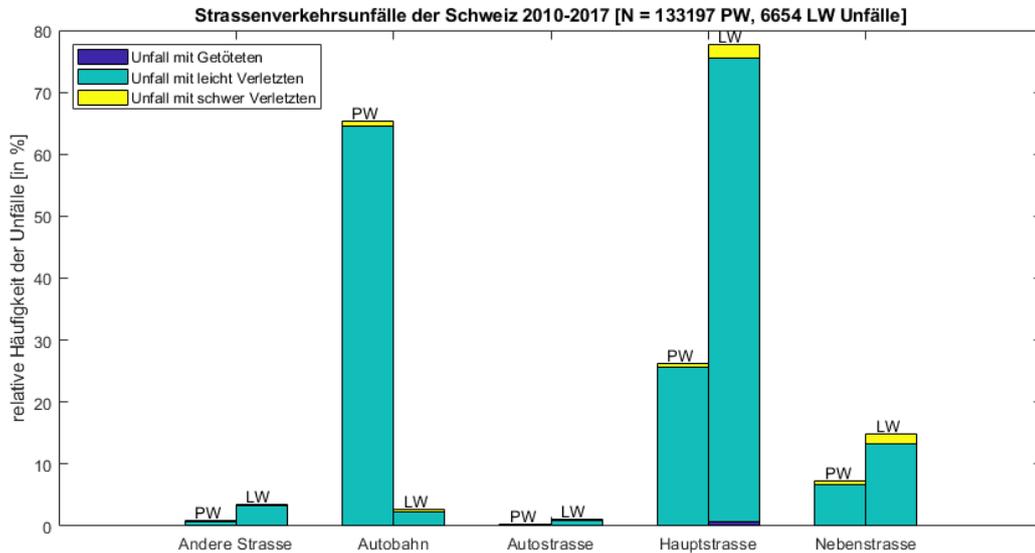
**Abb. 52** Relative Häufigkeit der Unfalltypen bei Unfällen auf Schweizer Strassen mit Beteiligung von PW oder LW der Jahre 2010 bis 2017, unterteilt nach Strassentyp

Die Unfälle mit Beteiligung von Personenwagen (PW) oder Sachtransportfahrzeugen (LW) gehörten in den meisten Fällen zu den Auffahrunfällen, den Schleuderunfällen bzw. den Unfällen beim Richtungswechsel. Aus der *Abb. 52* ist bereits zu erkennen, dass die meisten Unfälle auf Innerortsstrassen geschehen. Die *Abb. 53* verdeutlicht dies, indem auf der x-Achse die verschiedenen Strassentypen dargestellt werden. Die Unfälle sind ausserdem getrennt für die Fahrzeugtypen Personenwagen (PW) und Sachtransportfahrzeuge (LW) dargestellt. Die Häufigkeit der einzelnen Unfälle wird relativ zu allen Unfällen des Fahrzeugtyps angegeben.



**Abb. 53** Relative Häufigkeit der Strassenverkehrsunfälle der Schweiz nach Strassentyp, Unfalltyp und Fahrzeugtyp

Aus der Grafik wird deutlich, dass die LW-Unfälle vermehrt auf den Ausserortsstrassen und die PW-Unfälle vermehrt auf den Innerortsstrassen auftreten. Insgesamt ist zu beachten, dass PW in 90 % mehr Unfälle involviert sind als LW. In der folgenden *Abb. 54* wird die Unfallschwere der Unfälle betrachtet. Es ist zu erkennen, dass unter den Unfällen mit Personenschaden, die meisten Verunfallten leicht verletzt sind. Unfälle mit schwerem Personenschaden oder Getöteten gibt es nur selten, vermehrt bei den Unfällen mit Lastwagen.



**Abb. 54** Relative Häufigkeit der Strassenverkehrsunfälle der Schweiz nach Strassentyp, Fahrzeugtyp und Unfallfolgen

Durch die Einführung von Automatisierung können sich die Konflikte im Strassenverkehr deutlich verändern. So kann sich die Verteilung der Konflikte und Unfälle verschieben, da durch automatisierte Fahrzeuge evtl. andere Aspekte schwerpunktmässig zu Konflikten führen werden als beim Menschen. Andererseits kann sich die Sicherheit dahingehend verändern, dass durch das andere Verhalten automatisierter Fahrzeuge die Anzahl der auftretenden Konflikte und Unfälle verringert oder steigt. Um die Auswirkungen von automatisiertem Fahren auf die Sicherheit im Verkehr auf Schweizer Strassen beurteilen zu können, werden in den folgenden Abschnitten die Aspekte Unfallvermeidung durch Automatisierung und Unfallentstehung durch Automatisierung genauer betrachtet und analysiert.

### 7.3.3 Abschätzung des Beitrags der Automatisierung zur Unfallvermeidung

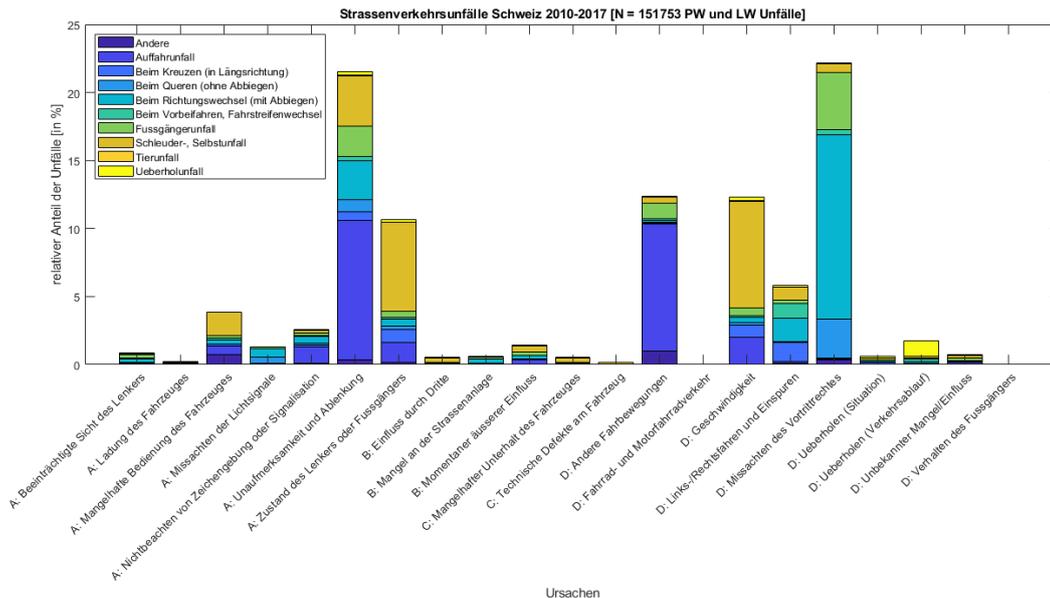
Um die Unfallvermeidung durch Automatisierung quantifizieren zu können, wurden historische Unfalldaten der Schweiz analysiert und hinsichtlich der Adressierbarkeit durch automatisiertes Fahren ausgewertet. Für die Bewertung der Adressierbarkeit der historischen Unfälle durch automatisiertes Fahren, stützt sich diese Analyse auf die Kategorisierung der Strassenverkehrsunfälle nach den Ursachen der Unfälle. Bei der Unfallaufnahme durch die Polizei wird jeweils angegeben, welche Ursache mutmasslich zu dem Unfall geführt hat. Dabei können mehrere Ursachen pro Unfall angegeben werden. Die Ursachen werden in die folgenden Gruppen und Untergruppen eingeteilt:

**Tab. 23** Gruppen und Untergruppen der Unfallursachen bei der Unfallaufnahme in der Schweiz

Gruppen	Untergruppen
1 Direkter Einfluss des Lenkers	11 Zustand / Absicht des Lenkers
	12 Beeinträchtigte Sicht des Lenkers
	13 Nichtbeachten von Zeichengebung oder Signalisation
	14 Missachten der Lichtsignale
	15 Mangelhafte Bedienung des Fahrzeuges
	16 Ladung oder Besetzung des Fahrzeuges
	17 Unaufmerksamkeit und Ablenkung
2 Äusserer Einfluss	21 Mangel an der Strassenanlage
	22 Momentan äusserer Einfluss
	23 Einfluss durch Dritte
3 Mängel am Fahrzeug	31 Mangelhafter Unterhalt
	32 Technische Defekte am Fahrzeug
4 Verkehrsablauf / Verkehrsregeln	41 Geschwindigkeit
	42 Links-/Rechtsfahren und Einspuren
	43 Überholen (Situation)
	44 Überholen (Verkehrsablauf)
	45 Missachten des Vortrittsrechts
	46 Andere Fahrbewegungen
	47 Fahrrad- und Motorfahrradverkehr
	48 Fahrzeugähnliche Geräte (FäG)
5 Direkter Einfluss des Fussgängers	51 Zustand des Fussgängers
	52 Einfluss oder Verhalten des Fussgängers
9 Unbekannte Ursache	91 Unbekannte Ursache

In den öffentlich verfügbaren Daten des Bundesamtes für Statistik werden die Ursachen «51 Zustand des Fussgängers» mit der Kategorie «11 Zustand des Lenkers» zusammengefasst. Innerhalb dieser Untersuchung sind jedoch nur Unfälle interessant, die von Personen- oder Lastwagen verursacht wurden. Auch Unfälle mit anderen Verkehrsteilnehmern als Hauptverursacher können gegebenenfalls von automatisierten Fahrzeugen verhindert werden. Beispielsweise durch eine schnellere Reaktion durch Ausweichen oder Bremsen auf ein Fehlverhalten eines anderen Verkehrsteilnehmers würden so zusätzlich Unfälle durch andere Hauptverursacher verhindert. Da allerdings die genauen Informationen über den Unfallhergang fehlen und auch abgeschätzt werden müsste wie häufig der Hauptverursacher auf ein automatisiertes Fahrzeug trifft, werden solche Fälle in dieser Auswertung nicht betrachtet. Ebenso verhält es sich mit den Unfällen der Kategorie «52 Einfluss und Verhalten des Fussgängers». Auch Unfälle mit unbekanntem Ursachen sind in den öffentlich verfügbaren Daten aus den Jahren 2010 bis 2017 nicht vorhanden.

Die folgende *Abb. 55* beinhaltet die Ursachen der Strassenverkehrsunfälle von Personen- und Sachtransportfahrzeugen. Deutlich zu erkennen ist, dass das Missachten des Vortrittsrechts, die Unaufmerksamkeit, andere Fahrtbewegungen, die Geschwindigkeit bzw. der Zustand des Lenkers zu den meisten Unfällen führt. Die im Vergleich oft auftretenden Auffahrunfälle werden meistens durch die Unaufmerksamkeit der Fahrer verursacht. Schleuderunfälle ereignen sich überwiegend durch den Zustand des Lenkers oder die nicht angepasste Geschwindigkeit. Die Unfälle des Typs "Beim Richtungswechsel", die gemäss *Abb. 52* in der Vergangenheit ebenfalls einen sehr grossen Anteil der Unfälle ausmachten, geschehen vor allem deshalb, weil die Fahrzeugführer das Vortrittsrecht missachteten. Aus diesen Analysen ist bereits ersichtlich, dass etliche dieser Unfälle durch Technik vermeidbar wären. Insbesondere ein automatisiertes Fahrzeug könnte wahrscheinlich einige dieser Unfälle verhindern.



**Abb. 55** Strassenverkehrsunfälle von Personen- und Sachtransportfahrzeugen der Schweiz in den Jahren 2010 bis 2017 nach Unfallursache und Unfalltyp

Jeder Ursachen-Untergruppe ist eine Reihe an konkreten Ursachen oder Mängeln zugeordnet, die eine genauere Beschreibung dessen wiedergibt, was zum Unfall führte. Die Mängel wurden hinsichtlich ihrer Adressierbarkeit durch zukünftige Fahrzeugtechnologien in die drei Kategorien voll adressierbar, teilweise adressierbar und nicht adressierbar unterteilt. Die folgende Tabelle enthält alle Kategorien der Mängel, die bei der Unfallaufnahme erfasst werden. Beispiele der Mängel, die zu einer Kategorie gehören, sind in Klammern zu jeder Kategorie angegeben. Weiterhin enthält die Tabelle die Einteilung in die Kategorien der Adressierbarkeit durch Automatisierung. Bei der Bewertung der Adressierbarkeit wird davon ausgegangen, dass die Algorithmen und Sensoren der Fahrzeuge stets voll funktionsfähig sind und sich gemäss den Verkehrsregeln verhalten.

**Tab. 24** Adressierbarkeit von Unfallmängeln durch Automatisierung

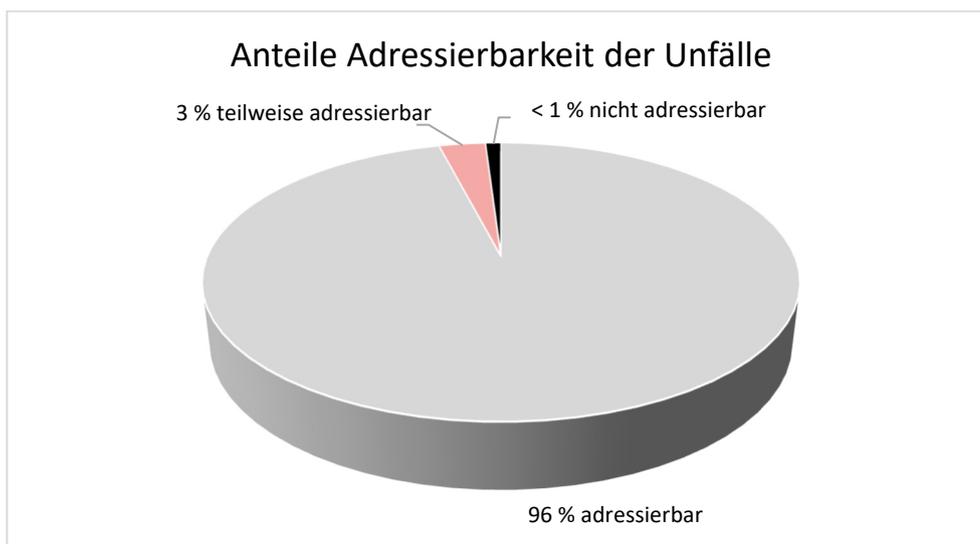
Mangel	voll adressierbar	teilweise adressierbar	nicht adressierbar
Beeinträchtigte Sicht des Lenkers (z.B. spätes Erkennen, Scheibe schlecht, Verdeckung)		X	
Ladung des Fahrzeugs (z.B. Verlieren von Ladung, Überladen, falsch Kuppeln von Anhängern)			X
Mangelhafte Bedienung des Fahrzeugs (z.B. falsche Zeichengabe, Nichtabblenden, ungenügendes Sichern beim Parken, Fahren ohne Licht, unvorsichtiges Öffnen der Tür)		X	
Missachten der Lichtsignale (z.B. Rotlichtverstoss etc.)	X		
Nichtbeachten von Zeichengebung oder Signalisierung (z.B. Polizei, Markierung, Signal)	X		
Unaufmerksamkeit und Ablenkung (z.B. Telefonieren, Mitfahrer)	X		
Zustand des Lenkers oder Fussgängers (z.B. Alkohol, Schwäche, Ermüdung)	X		
Einfluss durch Dritte (z.B. Missverständnis, Tiere, Erschrecken durch Hupen)		X	
Mangel an der Strassenanlage (z.B. schlechte Beleuchtung, Markierung, Signalisierung)		X	
Momentan äusserer Einfluss (z.B. Aquaplaning, Steinschlag, Windstoss, Hindernis, Ast fällt)			X
Mangelhafter Unterhalt des Fahrzeugs (z.B. Schneeketten, Blinker, Beleuchtung)			X
Technische Defekte am Fahrzeug (z.B. Motor, Getriebe, Kupplung, Material, Reifen)			X*
Andere Fahrbewegungen (z.B. Rückwärts, Parken, Halten, Wenden, Schikanestopp)	X		
Fahrrad- und Motorradfahrverkehr (z.B. Nichtbenützen von Radweg, Radstreifen, Nutzen des Trottoirs)			X
Geschwindigkeit (z.B. Nichtangepasst an Strasse, Linienführung, Sicht, Verkehr)	X		
Links-/Rechtsfahren und Einspuren (z.B. Kurvenschneiden, Nichteinspuren, verbotene Richtung)	X		
Missachten des Vortrittsrechts (z.B. für ÖV oder andere Verkehrsteilnehmer)	X		
Überholen (Situation) (z.B. in Kurve, vor Kuppe, Sicherheitslinie überqueren)	X		
Überholen (Verkehrsablauf) (z.B. bei Gegenverkehr, zu nah, rechts überholen)	X		
Unbekannter Mangel/Einfluss (z.B. parkiertes Fahrzeug, sonstiges)			X
Verhalten des Fussgängers (z.B. Spielen auf Fahrbahn, unvorsichtiges Überqueren)			X*

Legende:

- X\* = Denkbar, dass diese Unfallursachen durch AF vermehrt auftreten  
 grau hinterlegt = Hauptursache des Unfalls liegt nicht bei PW/LW

Einige der Ursachen sind mit einem Stern gekennzeichnet. Bei diesen ist es denkbar, dass sie nach Einführung des automatisierten Fahrens durch die neuen Technologien im Fahrzeug sogar vermehrt auftreten könnten. Hierauf wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen. Die grau hinterlegten Mängel sind solche, die in den Unfällen der PW und LW nicht vorhanden sind. Da die Mängel jeweils die Hauptursachen sind, die zu dem Unfall geführt haben, können bei den grau hinterlegten die PW und LW nicht die Hauptverursacher sein. Hat also beispielsweise das Fehlverhalten des Fussgängers zum Unfall geführt, so würde der Unfall zur Kategorie Unfälle mit Fussgängern zählen, da auch hier jeweils der Hauptverursacher genannt ist. Es besteht die Möglichkeit, dass auch solche Unfälle in Zukunft durch automatisierte Fahrzeuge adressiert werden können. Trägt beispielsweise ein Fussgänger an einem Unfall die Schuld, da dieser unvorsichtig auf die Fahrbahn gelaufen ist, kann es sein, dass ein automatisiertes Fahrzeug, im Gegensatz zum menschlichen Fahrer, trotzdem schnell genug reagieren könnte, da die Erkennung und Reaktion ggf. genauer und schneller vorstättengeht. Auch hier gibt es allerdings physikalische Grenzen ab denen auch das automatisierte Fahrzeug solche Unfälle nicht mehr verhindern kann. Für die Analyse innerhalb dieses Projektes wurden solche Fälle nicht betrachtet. Des Weiteren können Unfälle mit unbekanntem Mängeln nicht weiter bewertet werden, da hier zu wenig Informationen vorhanden sind. Sie werden daher den nicht adressierbaren Unfällen zugeordnet.

Aus der Gruppierung der Unfallmängel und -einflüsse in der oben dargestellten Tabelle ergibt sich das in *Abb. 56* dargestellte Ergebnis, dass 96 % der historischen Unfälle der Personen- und Güterfahrzeuge in der Schweiz durch zukünftige Fahrzeugtechnologien (Voraussetzung Fehlerfreiheit) vermieden werden könnten.



**Abb. 56** Anteile Adressierbarkeit von Unfällen (Personen- und Güterverkehrsfahrzeuge)

Die hier errechneten Ergebnisse sind vergleichbar mit Ergebnissen zum selben Thema in anderen internationalen Studien. So wurden von der bfu verschiedene Studien (Uhr, 2016) analysiert, die ebenfalls Faktoren identifizieren, welche durch automatisiertes Fahren eliminiert werden. Somit besteht ein Potenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit. Es wird auf Studien verwiesen, die ermitteln, dass die Unfälle der Personenwagen durch die zunehmende Automatisierung bis zum Jahr 2050 um 50 % zurückgehen und bis zum Jahr 2070 nahezu vollständig eliminiert werden können (Uhr, 2016). Auch andere Studien nutzen ähnliche Herangehensweisen wie die hier gewählten und prognostizieren, dass Unfälle, die durch menschliches Fehlverhalten verursacht werden, eliminiert werden können. Das betrifft 93,5 % aller Unfälle (Winkle, 2015). Ähnliche Ergebnisse zeigt auch Kockelman in seiner Studie (Kockelman, 2017), die einen sog. Crash Reduction Factor für AF zwischen 87,5 % und 99,75 % je Unfallursache bei einer Durchdringung von 90 % AF ausweist.

Um den Einfluss dieser Ergebnisse auf die Sicherheit im Verkehr in den Jahren 2030, 2040 und 2050 bewerten zu können ist es nötig, die Verkehrszusammensetzung in den Zeitschritten zu analysieren und auf dieser Grundlage das Potenzial der Unfallvermeidung abzuschätzen. Die Flottenzusammensetzung zu den jeweiligen Zeitpunkten kann dem von TP5 entwickelten Flottenmodell entnommen werden. Wären alle Fahrzeuge automatisiert, könnten 96 % der Unfälle, die von PW oder LW verursacht werden, vermieden werden. Um jedoch den Einfluss der mit Hilfe des Flottenmodells prädizierten Fahrzeugflotte auf die Verkehrssicherheit berechnen zu können, müssen die aus TP2 stammenden Fahrleistungen von automatisierten und konventionellen Fahrzeugen verglichen werden. Es ergeben sich die folgenden Formeln zur Abschätzung des Unfallvermeidungspotenzials ( $UV_{Pot}$ ) nach Einführung des automatisierten Fahrens auf den verschiedenen Strassentypen:

$$UV_{Pot,HLS} = \frac{99\% * Fahrleistung_{autom,HLS}}{Fahrleistung_{alle,HLS}}$$

$$UV_{Pot,HVS} = \frac{96\% * Fahrleistung_{autom,HVS}}{Fahrleistung_{alle,HVS}}$$

$$UV_{Pot,ES} = \frac{76\% * Fahrleistung_{autom,ES}}{Fahrleistung_{alle,ES}}$$

Um eine Bewertung hinsichtlich der verschiedenen Strassentypen der Schweiz (HLS, HVS, ES) zu ermöglichen, wird dieser Ansatz je Strassentyp gesondert durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse können *Tab. 25* entnommen werden, welche das Unfallvermeidungspotenzial, was sich aus dem oben beschriebenen Ansatz für die einzelnen Strassentypen und Zeitschritten durch die automatisierten Fahrzeuge ergibt, darstellt.

**Tab. 25** Unfallvermeidungspotenzial durch automatisiertes Fahren nach Jahr, Strassentyp und MATSim-Szenario unter oben beschriebenen Annahmen

Szenario	HLS 2030	HLS 2040	HLS 2050
Trendszenario (Szenario A)	6 %	19 %	59 %
Extremszenario Pro Sharing (Szenario B)	7 %	34 %	82 %
Szenario	HVS 2030	HVS 2040	HVS 2050
Trendszenario (Szenario A)	5 %	21 %	57 %
Extremszenario Pro Sharing (Szenario B)	7 %	32 %	78 %
Szenario	ES 2030	ES 2040	ES 2050
Trendszenario (Szenario A)	5 %	17 %	46 %
Extremszenario Pro Sharing (Szenario B)	6 %	25 %	63 %

Die Ergebnisse zeigen, dass in den Jahren 2040 und 2050 das Unfallvermeidungspotenzial deutlich zunimmt. Dies liegt an der steigenden Fahrleistung der AF in diesen Zeitschritten. In Vergleichen zwischen den beiden Szenarien bildet das Szenario B ein grösseres Unfallvermeidungspotenzial. Auch dies liegt an den dort höheren Fahrleistungen von AF (vgl. dazu auch Kapitel 6.3). Insgesamt ist festzustellen, dass die hier getroffenen Aussagen reine Abschätzungen auf Grund von historischen Daten sind.

Der Detaillierungsgrad der vorliegenden Datengrundlage ist nicht ausreichend, um Aussagen machen zu können, ob ein automatisiertes Fahrzeug, wenn es in dieselbe Situation wie ein erfasstes Unfallfahrzeug gekommen wäre, ebenfalls einen Unfall hervorgerufen hätte. Ebenso kann nicht ermittelt werden, ob ein automatisiertes Fahrzeug überhaupt in eine vergleichbare Situation gekommen wäre.

### 7.3.4 Abschätzung des Beitrags der Automatisierung zur Unfallentstehung

Es ist zu erwarten, dass die Automatisierung des Verkehrs nicht nur Unfälle vermeidet, sondern auch einige (ggf. auch neue) Unfallursachen fördert. Das kann nicht nur durch Fehler oder technische Probleme bei den automatisierten Fahrzeugen vorkommen, sondern auch durch Konflikte mit anderen Verkehrsteilnehmern, die dann vermehrt auftreten. Im Folgenden werden die möglichen Konflikte, in die automatisierte Fahrzeuge gerate können strukturiert nach dem Konfliktpartner dargestellt.

#### Konflikte zwischen AF und konventionellen Verkehrsteilnehmern

Insbesondere zu Beginn der Einführung von AF ist es möglich, dass es vermehrt zu Konflikten mit konventionellen Fahrzeugen und anderen menschlichen Verkehrsteilnehmern kommt. Insbesondere, da automatisierte Fahrzeuge voraussichtlich andere Verhaltensmuster an den Tag legen werden oder die menschlichen Verkehrsteilnehmer noch lernen müssen mit dem Verhalten der AF umzugehen. So ist es beispielsweise vorstellbar, dass das vorhersehbare und regelkonforme Verhalten automatisierter Fahrzeuge von konventionellen Fahrern mutwillig ausgenutzt werden könnte und daraus gefährliche Situationen entstehen (z.B. Einfädeln auf HLS oder Fussgänger auf der Fahrbahn). Wie bereits im Kapitel 7.3.3 diskutiert wurde, ist es somit denkbar, dass Unfälle mit dem Mangel der Kategorie «Verhalten der Fussgänger» vermehrt vorkommen werden. Darüber hinaus kann es zu Situationen kommen, welche für konventionelle Fahrer schwer einschätzbar und somit potenziell gefährlich sein könnten. Denkbar wäre hier beispielsweise ein abruptes Abbremsen eines automatisierten Fahrzeugs. So könnte es geschehen, dass automatisierte Fahrzeuge vermehrt Unfälle von konventionellen Fahrzeugen verursachen. Diese «Überraschungseffekte» sind vor allem bei der Einführung automatisierter Fahrzeuge zu erwarten, wenn deren Fahrverhalten noch nicht von den konventionellen Fahrern erwartet wird. Ebenso sind Unfälle denkbar, welche dadurch ausgelöst werden, dass ein AF Verhaltensmuster von Personen nicht oder falsch interpretiert (bspw. ein Fahrgast der zur einer Tramhaltestelle läuft und vom AF als potenzieller, sich anbahnender Konflikt eingestuft wird). Auch könnte es passieren, dass ein AF die Verhaltensmuster von anderen Verkehrsteilnehmern nicht ausreichend vorhersehen kann oder implizite Kommunikation, wie beispielsweise vorwegnehmendes Handeln nicht korrekt interpretiert und deshalb Konflikte hervorruft, welche unter nicht automatisierten Verkehrsteilnehmern oder zwischen AF nicht auftreten. Gleiches gilt ebenso für Situationen, in denen Verkehrsteilnehmer ihre Absichten kommunizieren, wenn diese nicht eindeutig durch die Verkehrsregeln vorgegeben sind oder diesen nicht entsprechen.

#### Konflikte zwischen AF und anderen automatisierten Verkehrsteilnehmern

Auch zwischen mehreren automatisierten Fahrzeugen kann es zu gefährlichen Situationen und Unfällen kommen. Insbesondere wenn AF mehrerer Generationen und mit unterschiedlichem technischen Fortschritt auf den Strassen aufeinandertreffen ist dies denkbar. Automatisierung wird schrittweise voranschreiten, was dazu führt, dass auch verschiedene automatisierte Fahrzeuge immer unterschiedliche Technik verwenden werden und unterschiedlich Möglichkeiten zur Umfelderkennung, -interpretation und Handlungsausführung haben. Das kann dazu führen, dass das maximale Unfallvermeidungspotenzial nur zwischen AF gleicher Art realisiert werden kann. Auch ist es möglich, dass Konflikte unter AF entstehen, da evtl. nicht alle notwendigen Informationen mit allen AF geteilt werden können. Auch hier sind manipulative Verhaltensweisen zwischen Fahrzeugen denkbar, die eine Art AF gegenüber anderen bevorzugen.

## Konflikte zwischen AF und anderen Objekten, der Umwelt oder AF-interne Probleme

Durch das Nichtanwesendsein eines Fahrers müssen viele Verantwortlichkeiten an das Fahrzeug übergehen. Unfälle, die beispielsweise durch «unvorsichtiges Öffnen der Fahrzeugtür» entstehen, müssen von weiteren, neuen Sicherheitssystemen im Fahrzeug adressiert werden. Es ist denkbar, dass durch automatisierte Fahrzeuge die Vertrautheit im Umgang mit dem Fahrzeug und den Verkehrsregeln sinkt und hierdurch neue Unfälle entstehen können. Es besteht insbesondere das Risiko, dass bei Level 4 ein Kompetenzverlust des Fahrers einhergeht. So zeigt die Studie der Universität Braunschweig, dass Fahrer zusätzliche Zeit benötigen, um komplexe Fahrsituationen zu erfassen, wenn sie vom Fahrzeug aufgefordert werden, die Kontrolle zu übernehmen (Vogelpohl, et al., 2018).

AF müssen stets in der Lage sein, die Umweltbedingungen zu erkennen, zu interpretieren und ein angemessenes Fahrverhalten daraus abzuleiten. Hierbei kann es zu Problemen kommen, sollten ungewöhnliche oder seltene Situationen auftreten. Auch unbekannte oder falsch erkannte Objekte können ungewünschte Reaktionen bei automatisierten Fahrzeugen auslösen und so zu Konflikten führen.

Die folgende Tabelle fasst die möglichen Konflikte zusammen und gibt eine qualitative Abschätzung wann die Konflikte sich vermutlich vorrangig häufen werden.

**Tab. 26** Übersicht Konfliktpotenziale nach Konfliktpartner und Auftretenshäufigkeit

Konfliktpartner AF mit...	Konfliktpotenziale	Auftretenshäufigkeit
konventionellem Fahrzeug nichtmotorisiertem/verletzlichem Verkehrsteilnehmer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verständigung/Kommunikation</li> <li>• Manipulation</li> <li>• Interpretation von Handlungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zu Beginn der Einführung AF</li> </ul>
anderem AF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Softwarestand</li> <li>• Technik</li> <li>• Manipulation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wenn AF verschiedener Generationen vorhanden sind</li> </ul>
Umwelt (andere Objekte, Infrastruktur, Wetter etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interpretationsfehler</li> <li>• Übergabe von Fahraufgaben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zu Beginn der Einführung AF</li> </ul>

Es ist zu erwarten, dass die Konflikte im Mischverkehr vor allem zum Zeitpunkt der Einführung automatisierter Fahrzeuge, aufgrund des geringen Bekanntheitsgrades der Systeme, und zum Zeitpunkt der grösstmöglichen Durchmischung des Verkehrs (50 % Automatisierungsgrad) gehäuft auftreten werden. Im Zuge dessen, stellt sich die Frage, ob die Software automatisierter Fahrzeuge regelmässig auf den neuesten Stand gebracht werden sollte und ob es regulatorische Mindestupdatezeiten geben sollte, um die Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer zu maximieren.

Während einige Unfälle in einer Zukunft mit automatisierten Fahrzeugen evtl. nicht mehr auftreten ist es möglich, dass neue Arten von Unfällen und Konflikten entstehen, die heute noch nicht absehbar sind. Neue Unfalltypen und Unfallursachen werden erst kategorisiert und erforscht werden können, sobald solche Fahrzeuge im Realverkehr zu beobachten sind. Insbesondere in den Übergangszeiten mit geringeren Durchmischungsgraden und noch «junger», heterogener Automatisierungstechnik ist kaum von einem spürbaren Rückgang der Unfallzahlen auszugehen, allenfalls von einem «Ersatz» einiger vermiedener, leicht zu handhabender Unfalltypen (bspw. leichte Schäden bei Parkierungsvorgängen) durch neue Typen aufgrund fehlerhafter Technik oder noch nicht beherrschter komplexerer Verkehrssituationen.

### 7.3.5 Massnahmenfelder zur Erhöhung der Sicherheit

Wie im vorherigen Abschnitt identifiziert, ist damit zu rechnen, dass automatisierte Fahrzeuge das Potenzial haben, die Verkehrssicherheit auf den Strassen zu erhöhen. Allerdings wurden auch einige Aspekte genannt, die durch automatisiertes Fahren nicht adressiert werden können oder gar erst durch das Auftreten von automatisierten Fahrzeugen zum Problem werden. Dieses Kapitel beschreibt Massnahmenfelder, die diese Probleme adressieren. Einerseits liegen diese Massnahmen in der Gestaltung der Strasseninfrastruktur, darüber hinaus werden regulatorische Massnahmen vorgeschlagen. Weitere Massnahmen zur Verbesserung der Verkehrssicherheit im Mischverkehr werden in Kapitel 8.1 erarbeitet.

#### Ausgestaltung der zukünftigen Strasseninfrastruktur

Etliche der Gestaltungsrichtlinien für den Entwurf von Strassen, die heutzutage verwendet werden, sind massgeblich davon getrieben, dass der Strassenverkehr möglichst sicher ablaufen soll. So ist beispielsweise in der Bestimmung des notwendigen Strassenquerschnitts zu berücksichtigen, welche Verkehrsteilnehmer dort verkehren und zusätzlich zu den Grössen der Bemessungsfahrzeuge Sicherheitsräume zu addieren. Da mit Hilfe neuer Technologien Fahrzeuge zukünftig spurgenaue fahren und das Sicherheitsbedürfnis von Fahrern beim Manövrieren auf Strassen, wo konventionelle Fahrzeuge nicht mehr vorhanden sind, keine Rolle mehr spielen, können auch die Anforderungen an die Strassengestaltung angepasst werden. So ist es denkbar, dass Fahrstreifenbreiten verringert werden können und strassenseitiges Parken untersagt werden kann, da weniger konventionelle Parkfelder benötigt werden (vgl. Kapitel 8.1) und sich damit der Platzbedarf einer Strasse reduziert. Auch ist es möglich, dass in einer Zukunft mit automatisierten Fahrzeugen gar keine Markierungen mehr vonnöten sind. Beide genannten Vorteile greifen in der Phase des Mischverkehrs jedoch noch nicht. Werden diese Massnahmen bereits im Mischverkehr umgesetzt, sollten konventionelle Fahrzeuge aus diesen Bereichen ausgeschlossen werden, da ansonsten eine erhöhte Gefahr für Unfälle besteht. Es kann also eine zusätzliche Aufteilung des Strassenraums erforderlich werden, um den Sicherheitsanforderungen der einzelnen Verkehrsteilnehmer gerecht zu werden. Der gewonnene Platz kann in den Städten anderweitig verwendet oder zu Mehrzweckräumen umgestaltet werden, sodass zwar zeitweise Fahrzeuge an gewissen Orten stehen können, beispielsweise um Fahrgäste abzusetzen oder zusteigen zu lassen, jedoch diese Bereiche nicht dauerhaft dafür bereitstehen müssen und evtl. auch nicht in so grossen Umfang wie bisher. Sollten automatisierte Fahrzeuge in der Lage sein, eigenständig zu einem Parkplatz zu fahren, kann der Bedarf an Parkplätzen durch Parkplätze ausserhalb der Innenstädte abgedeckt werden. Sollte es dazu kommen, dass Szenarien eintreten, in denen die Menschen vermehrt Sharing-Fahrzeuge nutzen und weniger private PW besitzen, so sinkt auch die Grösse der Fahrzeugflotten (vgl. Kapitel 4), was auch mit einem geringeren Bedarf an Abstellorten für Fahrzeuge einhergeht.

Andererseits sind evtl. neue infrastrukturelle Einrichtungen nötig, um den zukünftigen Verkehr sicher abwickeln zu können. Beispielsweise bedarf es weiterhin Flächen, auf denen Passagiere ein- und aussteigen können. In diesen sog. Pick-up- und Drop-off-Bereichen (PUDO-Bereiche) bzw. an Orten zum Umsteigen auf ein anderes Verkehrsmittel (sog. Hubs), kommt es zu einem erhöhten Fussgängeraufkommen. Die sichere Ausgestaltung solcher Bereiche, die es den Passagieren erlaubt, das Transportmittel bequem und sicher zu wechseln, wird in Zukunft von besonderer Bedeutung sein. Dies ist nicht nur für die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems, sondern auch für die Sicherheit von Bedeutung. In diesem Zusammenhang ist es auch denkbar, besondere Wege für den Langsamverkehr, insbesondere Schutzeinrichtungen, einzurichten. Wie in den vorherigen Abschnitten erwähnt, kann es insbesondere zwischen automatisierten und nicht automatisierten Verkehrsteilnehmern weiterhin oder sogar verstärkt zu Konflikten kommen. Es ist denkbar, dass eine Trennung des motorisierten Verkehrs vom Langsamverkehr auch subjektiv für diese Verkehrsteilnehmer das Sicherheitsgefühl stärkt. Eine weitere Trennung zwischen automatisierten und nicht automatisierten Verkehrsteilnehmern kann auch beim motorisierten Verkehr dazu dienen, die Sicherheit im Strassenverkehr zu erhöhen. Um jedoch infrastrukturell auf eine Trennung zu verzichten, wäre es denkbar, konventionelle Fahrzeuge

auf einigen Strassenzügen komplett zu untersagen. Auch die Einrichtung von Notfallbuchten, die dazu dienen, ein automatisiertes Fahrzeug des Levels 4 in den sicheren Zustand zu bringen, wenn es am Ende des Anwendungsbereiches angekommen ist und kein Fahrer die Kontrolle übernimmt, ist denkbar. Die verschiedenen genannten Massnahmenfelder werden in Kapitel 8.1 vertieft und sind auch mit Massnahmen zur Optimierung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems zu kombinieren.

### **Vorgabe von zusätzlichen Verhaltensregeln im Mischverkehr**

Abgesehen von den infrastrukturellen Massnahmen, können auch regulatorische Mittel der Erhöhung der Verkehrssicherheit dienen. Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, kann es durch das Zusammentreffen von automatisierten und nicht automatisierten Verkehrsteilnehmern vermehrt zu Konflikten kommen. Um dem entgegenzuwirken, sind Massnahmen denkbar, die dieses Zusammentreffen aus Sicherheitsgründen regulieren. Dazu kann das schon erwähnte Verbot von bestimmten Verkehrsteilnehmern in bestimmten Bereichen gehören. Sollte das Vorhandensein konventioneller Fahrzeuge die Effizienz und Sicherheit des Bereiches beeinträchtigen, kann ein Verbot der konventionellen Fahrzeuge eine angemessene Massnahme sein (vgl. auch dazu Kapitel 8.1).

Des Weiteren ist die Erkennung und Kommunikation der Verkehrsteilnehmer untereinander von grosser Bedeutung, insbesondere wenn es um das Verhindern von Konflikten und Unfällen geht. Um Fehlern in der Kommunikation, Erkennung und Interpretation vorzubeugen, können durch regulatorische Eingriffe die Methoden der Kommunikation vorgeschrieben werden. So wäre beispielsweise auch die Ausstattung konventioneller Fahrzeuge mit Kommunikationseinheiten, die die genaue Position des Fahrzeugs übermitteln, denkbar. Die Standardisierung der Inhalte von kommunizierten Informationen ist hierbei ebenfalls noch ein offenes Thema. Auch Richtlinien für die Kommunikation der Absichten der automatisierten Fahrzeuge nach aussen, können hierbei eine Rolle spielen. Wenn sich zeigt, dass das Fahrverhalten der automatisierten Fahrzeuge für Andere nicht vorhersehbar oder verständlich ist, können sog. «external HMIs» dabei helfen, die Absichten des Fahrzeugs beispielsweise durch Lichtzeichen und Signale an andere zu übermitteln. Auch weitere Hinweise oder Schulungen für konventionelle Fahrer im Umgang mit automatisierten Fahrzeugen können helfen, solche Konflikte zu vermeiden.

Zudem besteht die Problematik, dass Menschen das Vorhandensein automatisierter Fahrzeuge im Strassenverkehr ausnutzen könnten, um sich selbst einen Vorteil zu verschaffen. Dies beispielsweise durch unsicheres Einfädeln oder Überqueren der Strasse, im Bewusstsein, dass automatisierte Fahrzeuge schnell reagieren können und der Sicherheit stets oberste Priorität gebührt. Diese Problematik kann durch eine entsprechende Regulierung adressiert werden. So ist es beispielsweise möglich, dass gefährliche Manöver der automatisierten Fahrzeuge gespeichert werden. Durch die Sensoren der Fahrzeuge, insbesondere der Kamerabilder, kann ein (Beinahe-) Unfall aufgezeichnet werden und später durch die Polizei oder das Gericht verwendet werden. Drohen den Menschen Bestrafungen für mutwillige Fehlverhalten ist damit zu rechnen, dass sich diese reduzieren.

## **7.4 Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems**

Automatisierte Fahrzeuge beeinflussen die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems. Dabei werden neben der reinen Leistungsfähigkeit des Systems auch andere Bereiche im Zusammenhang mit der Funktionsfähigkeit beeinflusst. Dabei wirken sich die AF und insbesondere der Mischverkehr zwischen AF und konventionellen Fahrzeugen unterschiedlich auf die verschiedenen Themenfelder der Funktionsfähigkeit aus. Im Folgenden wird zuerst der Begriff der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems definiert und abgegrenzt und im Anschluss Indikatoren identifiziert, anhand welcher die Effekte der AF analysiert werden. Dabei werden insbesondere auch die AF-induzierten Effekte auf die drei Pilotstrecken erläutert.

### 7.4.1 Definition und Abgrenzung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems

Die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems lässt sich anhand verschiedener Kriterien und Kenngrößen beschreiben und beurteilen. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit muss eine Fokussierung auf ausgewählte Indikatoren erfolgen. Explizit nicht Teil des Forschungsauftrags des TP5 sind Fragestellungen im Zusammenhang mit der Kapazität der Strassen, obwohl diese auch ein wichtiger Aspekt in der Betrachtung der Funktionsfähigkeit des Strassennetzes sind. Der Aspekt der Kapazität beziehungsweise die AF-induzierten Auswirkungen auf die Engpassthematik wird durch das TP2 behandelt. Zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems werden die im Folgenden gelisteten Indikatoren verwendet, wobei je nach Datenverfügbarkeit auf quantitative oder qualitative Beurteilungsmethoden zurückgegriffen wird:

- Qualität der Erreichbarkeit in Form von Reisezeitveränderungen
- Zuverlässigkeit in Bezug auf die Reisezeit auf ausgewählten Relationen
- Verfügbarkeit der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur
- Qualität des Verkehrsablaufs in Bezug auf die Verkehrsdichte
- Übergabebereiche zwischen automatisiert und konventionell befahrenen Perimetern
- Umwidmung, Optimierung und temporäre Zuteilung der vorhandenen Verkehrsflächen
- Einfluss von AF den ÖV-Anteil
- Einfluss von AF auf die Haltestelleninfrastruktur
- Einfluss auf den Langsamverkehr

### 7.4.2 Indikatoren zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems

Die genannten Indikatoren zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems werden im weiteren Verlauf jeweils für die Modellberechnungen (MATSim-Umlegung durch TP2) des Teilraums Zürich ausgewertet. Dabei werden die beiden beschriebenen Szenarien A und B (vgl. Kapitel 6) untersucht und insbesondere die Unterschiede zwischen den Szenarien und den verschiedenen Zeitzuständen (2030, 2040, 2050) ausgewertet.

#### Qualität der Erreichbarkeit

Als Mass der Erreichbarkeit und zur Beurteilung der entsprechenden Qualität wird basierend auf den MATSim-Ergebnissen (TP2) die Entwicklung der mittleren Reisezeit auf ausgewählten Relationen im Teilraum Zürich für die drei Zeitschritte und beiden Szenarien ausgewertet und verglichen. Dabei werden alle Wege auf den Relationen, die entweder mit einem AF oder einem konventionellen PW zurückgelegt werden, berücksichtigt. Die folgenden exemplarischen Relationen verbinden das Stadtgebiet mit dem Rest des Teilraums auf verschiedenen wichtigen Achsen. Die jeweiligen Start- und Zielgebiete werden mit einem rechteckigen Geofence approximiert. Anhand der Ergebnisse lassen sich auch allgemeine Rückschlüsse auf die Entwicklung der Erreichbarkeit im gesamten Teilraum ziehen.

- Zürich → Dietikon
- Zürich → Winterthur
- Zürich → Thalwil

Die genannten Relationen sind auf der folgenden Karte dargestellt.

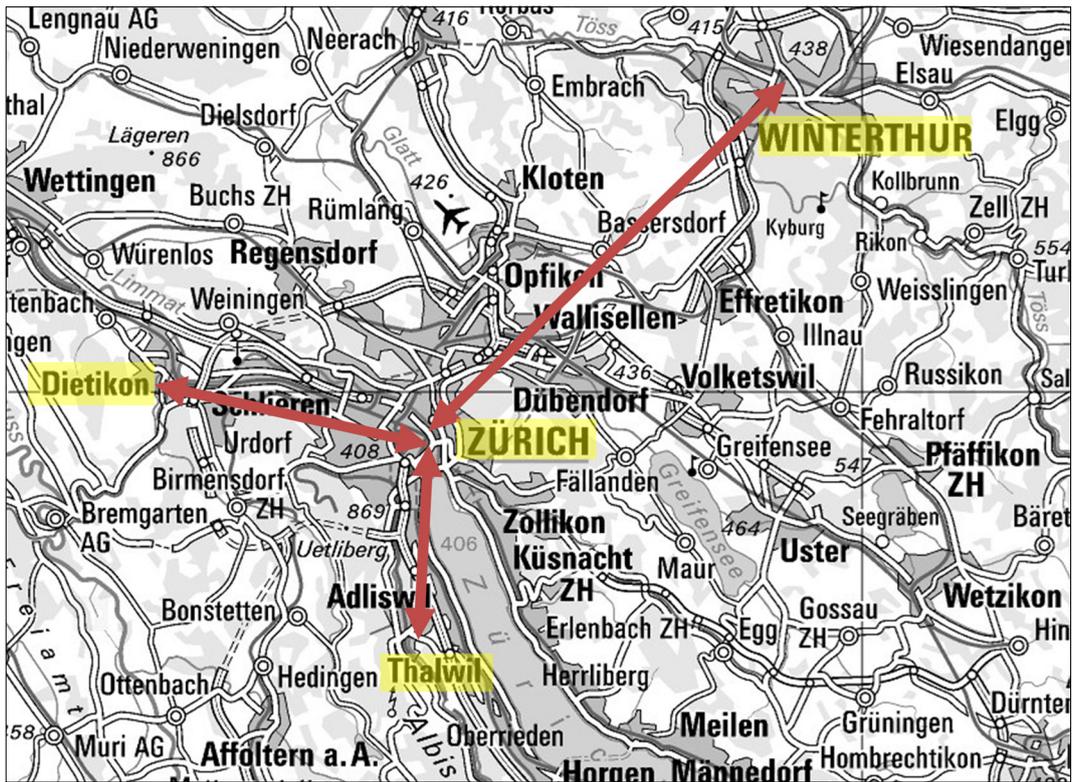


Abb. 57 Übersichtskarte der ausgewählten Relationen zur Reisezeitauswertung

Die Entwicklung der mittleren Reisezeiten auf den genannten Relationen über die drei Zeitschritte (2030 = rot, 2040 = blau, 2050 = grau) sind in der folgenden Abb. 58 für die beiden Szenarien (Szenario A = Vollfarbe, Szenario B = Schraffur) dargestellt.

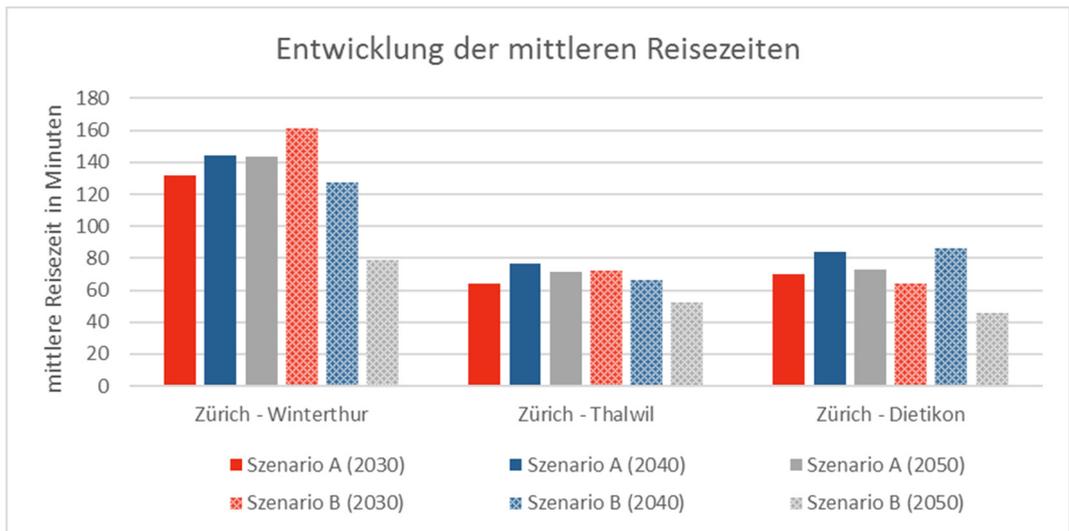


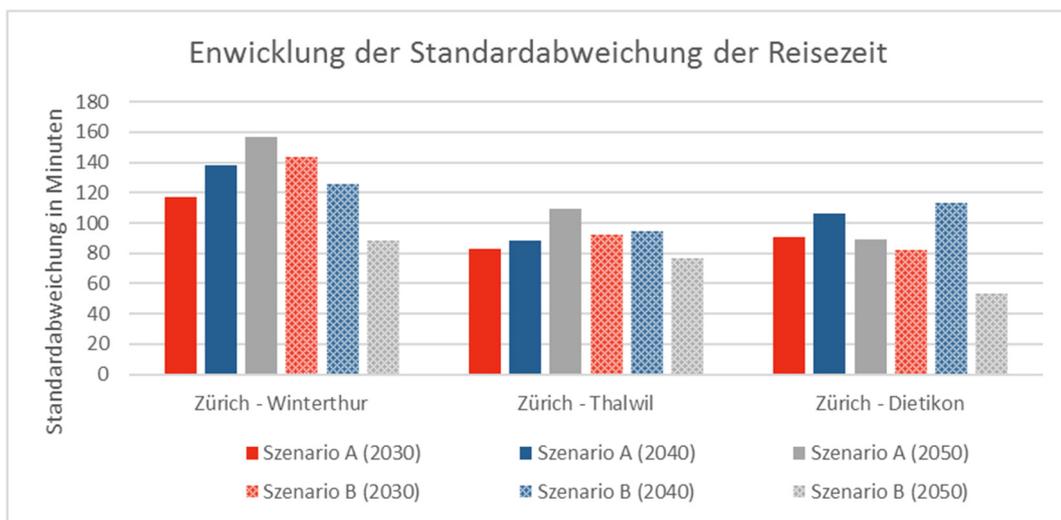
Abb. 58 Entwicklung der mittleren Reisezeit auf den ausgewählten Relationen.

Die Auswertungen zeigen, dass im Szenario A auf allen Relationen 2040 die längsten Reisezeiten entstehen. Dies ist der Zeitpunkt mit einem hohen Mischverkehrsanteil (noch relativ viele konventionelle Fahrzeuge, aber auch schon eine wesentliche Anzahl AF). Auch 2050 sind im Szenario A die Reisezeiten länger, als im Szenario 2030, was eine Verschlechterung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems indiziert. Im Szenario B gehen die Reisezeiten mit der Zeit zurück (Ausnahme Zürich → Dietikon). Besonders deutlich ist dieser Effekt auf der Relation von Zürich nach Winterthur zu erkennen. Eine mögliche Er-

klärung dafür ist der Rückgang der Fahrzeugflotte und u.U. auch die Erhöhung der Kapazität durch AF (vgl. dazu auch den Schlussbericht des TP2). Im Vergleich der Szenarien schneidet in Bezug auf die Entwicklung der Reisezeit das Szenario B besser ab als Szenario A. Auffällig sind zudem die sehr hohen absoluten Werte der mittleren Reisezeiten auf den Relationen. Diese sind gemäss TP2 teilweise auf Modelleffekte zurückzuführen. Die relativen Aussagen im Vergleich der Zeitschritte und Szenarien zueinander sind davon jedoch unabhängig gültig.

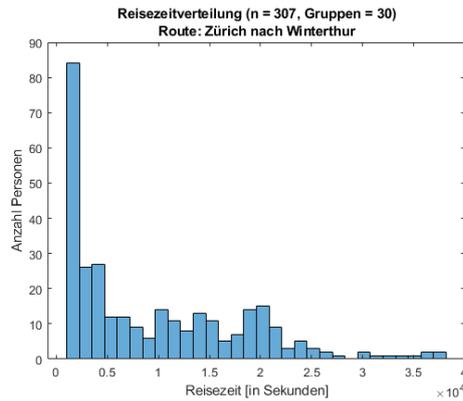
### Zuverlässigkeit in Bezug auf die Reisezeit

Neben der mittleren Reisezeit in Bezug auf die Erreichbarkeit sind auch die Schwankungen der Reisezeiten in Hinblick auf die Zuverlässigkeit ein Mass für die Beurteilung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems. In diesem Zusammenhang werden analog des Indikators Erreichbarkeit die genannten Relationen für die beiden Szenarien und die drei Zeitschritte basierend auf den MATSim-Ergebnissen (TP2) ausgewertet und entsprechend die Entwicklung der Standardabweichung von der mittleren Reisezeit verglichen. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung entsprechend dargestellt.

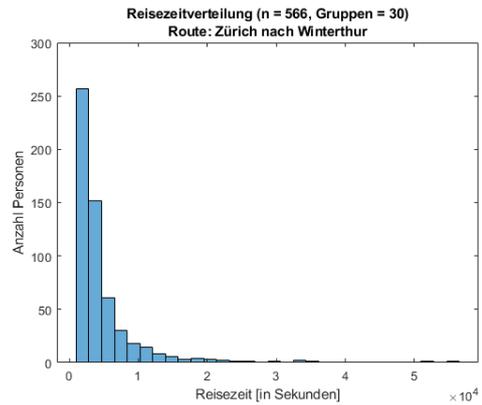


**Abb. 59** Entwicklung der Standardabweichung der Reisezeit der ausgewählten Relationen

Die Auswertungen zeigen, dass auch die Zuverlässigkeit in Bezug auf die Reisezeit im Szenario B spätestens 2050 deutlich verbessert wird. Im Gegensatz dazu sinkt die Zuverlässigkeit (Erhöhung der Standardabweichung) im Szenario A mit der Zeit eher. Dies gilt insbesondere auf der Relation von Zürich nach Winterthur. Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsauswertungen verstärken somit die Erkenntnisse, die durch die Auswertung der mittleren Reisezeit gewonnen wurden. Neben der Reisezeit verbessert sich im Szenario B auch die Zuverlässigkeit auf den ausgewerteten Relationen. Im Szenario A ist ein gegenteiliger Effekt erkennbar. In Bezug auf die absolute Grösse der Standardabweichung werden analog der Reisezeiten sehr hohe Werte ermittelt. Dies weist auf eine grosse Streuung der Reisezeiten hin. In den folgenden *Abb. 60* und *Abb. 61* sind beispielhaft Histogramme für die Relation von Zürich nach Winterthur für den Fall Szenario B 2030 und 2050 dargestellt. Diese zeigen einige Wege mit einer Reisezeit von über 7 h (> 2'500 s), was aus Sicht TP5 als nicht realistisch eingeschätzt wird und zum einen den Mittelwert und zum anderen auch die Standardabweichung der Reisezeiten stark ansteigen lässt. Diese Modelleffekte sind gemäss TP2 u.U. auf Umlagerungseffekte zwischen parallelen Strecken zurückzuführen. Die relativen Aussagen im Vergleich der Zeitschritte und Szenarien zueinander sind davon jedoch unabhängig gültig. Auch ist in den folgenden Grafiken zu erkennen, dass die Streuung der Reisezeiten im Jahr 2050 deutlich geringer ist, was ebenfalls an der geringeren Flottengrösse liegen kann.



**Abb. 60** Reisezeitverteilung auf der Route Zürich-Winterthur im Szenario B im Jahr 2030



**Abb. 61** Reisezeitverteilung auf der Route Zürich-Winterthur im Szenario B im Jahr 2050

### Verfügbarkeit der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur

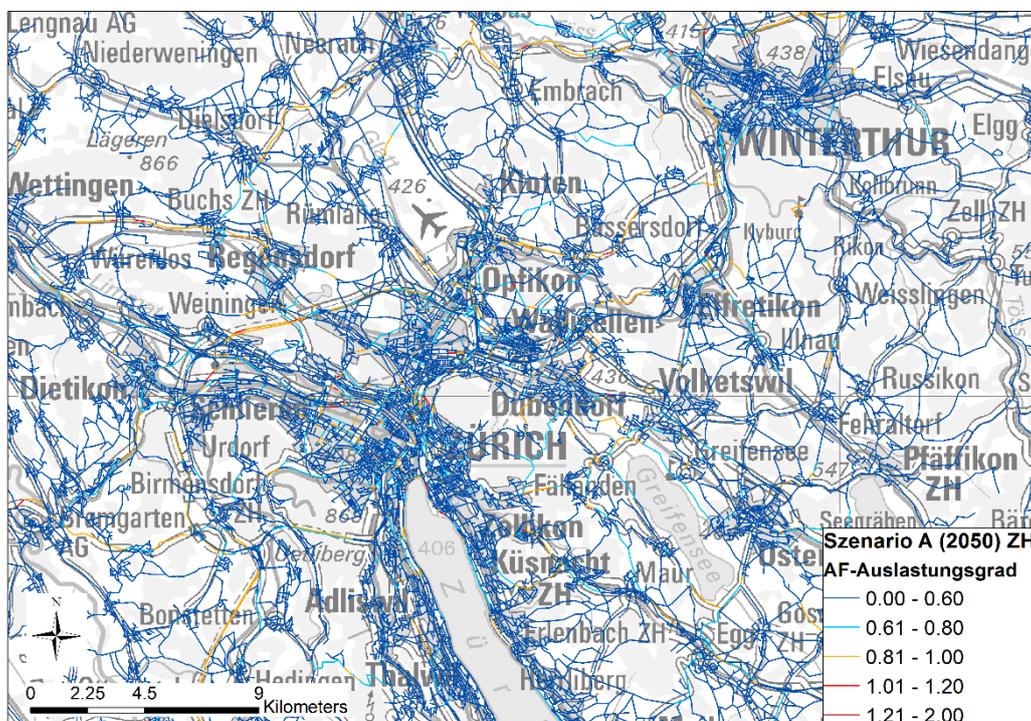
Die Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur wird anhand der Auslastung im gesamten Netz analysiert. Wie bereits in Kapitel 6.3 gezeigt, bleibt der mittlere Auslastungsgrad im Netz über die Zeitschritte auf einem konstanten Niveau. Dies schliesst jedoch nicht aus, dass einzelne Streckenabschnitte zeitweise überlastet sein können. Eine detaillierte räumliche Auswertung der Streckenauslastung (Belastung/Streckenkapazität) ist mithilfe der MATSim-Ergebnisse aufgrund des Modellaufbaus nicht ohne weiteres möglich. Das TP2 befasst sich im Rahmen der Engpassanalyse detailliert mit dem Thema der zukünftigen Auslastungs- und der Kapazitätsentwicklung in Abhängigkeit der beiden Szenarien.<sup>2</sup>

Die Ergebnisse der Engpassanalyse (vgl. TP2) lassen dann auch Rückschlüsse auf die Verfügbarkeit der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur zu und eignen sich deshalb auch als Indikator zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems. Die genannten Ergebnisse bzgl. der Auslastungsgrade liegen aufgrund des gegebenen Aufbaus des vorliegenden Forschungspakets aktuell noch nicht vor. Es wird jedoch empfohlen, diese im Rahmen der folgenden Synthesearbeiten entsprechend zu berücksichtigen. Zu den Modellergebnissen ist zudem anzumerken, dass MATSim ein agentenbasiertes Verkehrsmodell ist und einen typischen Werktag simuliert. Dadurch ist es möglich, dass MATSim-Agenten im Modell aufgrund von Kapazitätsengpässen auf andere Zeiten, Strecken oder Verkehrsmittel ausweichen, um ihren Tagesplan zu optimieren bis ein Nutzergleichgewicht erreicht wird. Solche Effekte sind in der dargestellten Karte und den Auswertungen des Auslastungsgrads nicht zu erkennen.

<sup>2</sup> Die Betrachtung der Auslastung erfolgt hier als Verhältnis von Verkehrsbelastung zu (theoretischer) Kapazität auf Basis des MATSim-Verkehrsmodells. Diese Betrachtung unterscheidet sich von der Engpassanalyse in drei Aspekten, wodurch die Resultate nicht direkt verglichen werden können. Erstens werden die Modellwerte in der Engpassanalyse mit aktuellen Messwerten der ASTRA-Zählstellen kombiniert. Dabei werden die gemessenen Jahres- und Tagesschwankungen mit entsprechenden Spitzenfaktoren berücksichtigt. Zweitens werden in der Engpassanalyse nur die Veränderungen der Verkehrsbelastungen aus MATSim verwendet und diese auf die Werte des Nationalen Personenverkehrsmodells (NPVM) überlagert, damit die Vergleichbarkeit mit bisherigen Resultaten der Untersuchungen zum Strategischen Entwicklungsprogramm Nationalstrassen (STEP-NS) hergestellt werden kann. Drittens unterscheidet sich die Modellierung der Kapazität in NPVM und MATSim grundlegend: Während im NPVM Capacity-Restraint-Funktionen angewendet werden, die eine Auslastung über 100% grundsätzlich zulassen, kann in MATSim die Verkehrsbelastung die hinterlegte Kapazität nicht überschreiten.

Um einen ersten Überblick über die Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur zu erhalten, werden die MATSim-Modellergebnisse der Abendspitze verwendet und die Verkehrsbelastungen (PCU) ins Verhältnis zur Streckenkapazität gesetzt. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass die AF und konventionelle Fahrzeuge unterschiedliche PCU aufweisen (vgl. dazu Kapitel 5.3). Die folgende Grafik zeigt beispielhaft für das Szenario A (2050), dass ein Grossteil des Strassennetzes gering ausgelastet ist. Es fällt auch auf, dass die HLS im Vergleich einen höheren Auslastungsgrad aufweist. Bezogen auf die drei Pilotstrecken (vgl. Kapitel 7.2) zeigt sich, dass der Auslastungsgrad auf den ausgewählten innerstädtischen Strecken ebenfalls gering ist. Wobei hierbei von grosser Relevanz ist, dass insbesondere auf innerstädtischen Strecken in der Regel die Streckenkapazität nicht massgebend ist, sondern die angrenzenden Knotenpunkte, die kapazitätslimitierende Elemente darstellen (vgl. auch hier die Engpassanalyse des TP2). Unabhängig von einzelnen, hoch ausgelasteten Streckenabschnitten ist die Verfügbarkeit des Verkehrssystems aber in allen Prognosezuständen grundsätzlich gewährleistet.

Bei den folgenden Auswertungen werden Strecken, die eine Belastung von weniger als 50 Fz/Tag aufweisen, nicht berücksichtigt, da diese quasi keine Belastung aufweisen und den Mittelwert der belasteten Strecken verfälschen würden. Ergänzend zur grafischen Aufbereitung des Auslastungsgrads wird in Kapitel 6.3 der mittlere Auslastungsgrad für die drei Zeitschritte und die beiden Szenarien miteinander verglichen.



**Abb. 62** Auslastungsgrad Szenario A (2050)

### Qualität des Verkehrsablaufs in Bezug auf die Verkehrsdichte

Ein weiteres Kriterium für die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems ist die Verkehrsdichte. Im Unterschied zur Verkehrsstärke geht es dabei nicht um Kapazitätseffekte, sondern verstärkt um die Ausübung unterschiedlicher Fahrmanöver oder auch den Komfort der Verkehrsteilnehmer auf einem Streckenabschnitt. Insbesondere der Fahrstreifenwechsel für den MIV und auch den Veloverkehr, z.B. im Bereich von Knotenpunkten, ist bei einer hohen Verkehrsdichte schwieriger. Gleiches gilt für das Queren von Fussgängern. Insbesondere in eng vermaschten Netzen wirkt sich eine hohe Verkehrsdichte negativ auf die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems aus. Automatisierte Fahrzeuge erreichen u.a. kapazitätssteigernde Effekt aufgrund kürzerer Fahrzeugfolgeabständen und kleinerer Zeitlücken (vgl. TP2 des vorliegenden Forschungsprojekts), was aber eine höhere Verkehrsdichte zur Folge hat. Solche hohen Dichten dürften gerade für Velofahrer eine (subjektive) Verschlechterung des Sicherheitsempfindens zur Folge haben.

Die Auswertung und detaillierte Analyse der Entwicklung der Verkehrsdichte über die Zeit und in Abhängigkeit der Szenarien wäre eine interessante Möglichkeit, die entsprechenden Effekte auf die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems zu quantifizieren. Die MATSim-Modellergebnisse liefern die Verkehrsdichte jedoch nicht als direktes Ergebnis. Aus diesem Grund sind im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts keine quantifizierbaren Auswertungen der Verkehrsdichte möglich.

### **Übergabebereiche zwischen automatisiert und konventionell befahrenen Perimetern**

Ein weiterer Aspekt bzgl. der Qualität des Verkehrsablaufs – losgelöst von Fragen der Kapazität – ist die Regelung der Übergabebereiche zwischen Perimetern bzw. Strecken, in welchen automatisiert gefahren wird und in welchen, in einer Übergangsphase, ein konventionelles Lenken erforderlich ist (Uhr, 2016). An dieser Schnittstelle muss ein «Fahrerwechsel» stattfinden oder die Möglichkeit geschaffen werden, dass der Passagier das AF verlässt und seinen Weg mit einem anderen Verkehrsmittel fortsetzt. Beide Fälle sind so zu regeln, dass der Verkehrsablauf möglichst wenig beeinflusst wird. In diesem Zusammenhang sind auch Massnahmen zu ergreifen, falls der Fahrerwechsel fehlschlägt oder nicht stattfinden kann (vgl. dazu auch Kapitel 8.1). Im vorliegenden Szenarioset (Szenario A und B) entstehen in den Zeitschritten 2030 und 2040 zwei typische Schnittstellen. Zum einen im Bereich der Autobahnausfahrten zwischen HLS und nachgelagertem Netz und zum anderen an den Grenzen der für AF freigegebenen Stadtgebiete. Die Ausgestaltung und Steuerung der Übergabebereiche ist individuell zu prüfen und auch in Abhängigkeit der erwarteten Verkehrsmengen sowie des vorherrschenden AF-Anteils zu regeln. Exemplarische Lösungsvorschläge und denkbare Massnahmenfelder werden im Kapitel 7.4.4 und Kapitel 8.1 beschrieben.

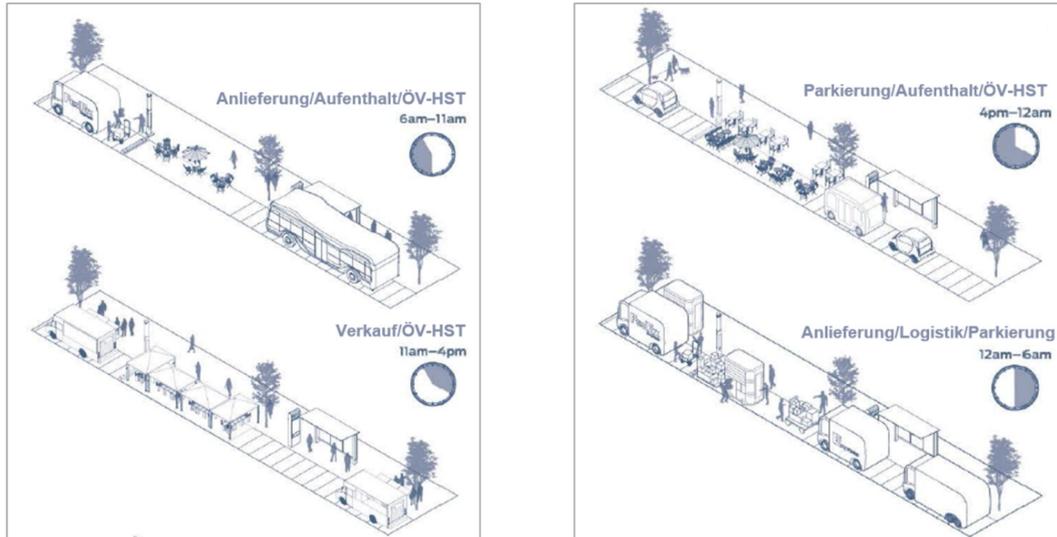
### **Umwidmung, Optimierung und temporäre Zuteilung der Verkehrsflächen**

Ein weiteres Kriterium zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems ist die Nutzung der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur bzw. deren Neuverteilung und das damit verbundene Potenzial zur Umwidmung dieser. Im Zusammenhang mit der Einführung von AF werden sich die Anforderungen an die Verkehrsinfrastruktur ändern (vgl. dazu auch Kapitel 7.4.3). Gerade der Aspekt der Neuzuteilung bzw. der Umnutzung von Teilflächen, welche heute durch den konventionell gesteuerten MIV beansprucht werden, wird ein hohes Potenzial attestiert (Heinrichs, 2015). Um die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems weiterhin zu gewährleisten, sind je nach Szenario und Zeitschritt unterschiedliche Massnahmen bzw. Flächenzuweisungen erforderlich. Dabei spielt insbesondere die Anzahl an Ein- und Aussteiger und die dadurch erforderlichen Anzahl an Pick-up- und Drop-off-Möglichkeiten sowie die zumindest im Mischverkehr weiterhin erforderlichen Parkplätze für konventionelle Fahrzeuge eine wichtige Rolle (vgl. Kapitel 8).

Darüber hinaus ist es auch ein Ziel des automatisierten Fahrens, die vorhandene Verkehrsfläche, insbesondere des MIV zu verringern bzw. zumindest nicht weiter auszubauen, um zusätzliche Flächen zur städtebaulichen Gestaltung oder für den Umweltverbund zu gewinnen. Unter diesem Aspekt kann die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems auch dahingehend aufgefasst werden, dass die Abwicklung der vorhandenen und zukünftigen Verkehrsnachfrage möglichst wenig Fläche beanspruchen soll. Die Erreichung dieses Ziels ist aufgrund der erwarteten Kapazitätsgewinne (zumindest bei 100 % AF) und der Nutzung neuer Angebotsformen (z.B. Sharing-AF, mobile Stationen, Verteilservice usw. (vgl. auch TP4) möglich, aber im Mischverkehr auch direkt von der Entwicklung der AF-Anteile auf den unterschiedlichen Strassenabschnitten abhängig und somit sowohl über die Zeitschritte, als auch bezüglich der Szenarien A und B unterschiedlich. Zentrale Herausforderung bleibt der Mischverkehr, durch welchen das (noch) Vorhandensein konventionell gesteuerter Fahrzeuge zu einer mehr oder weniger starken Einschränkung hinsichtlich möglicher baulicher Verringerungen von Fahrstreifenbreiten oder gar Neuzuteilung von MIV-Fahrstreifen führt.

Ein weiterer Ansatz im Zusammenhang mit der Umwidmung und Optimierung von vorhandenen Verkehrsflächen ist die temporäre Zuteilung einzelner Flächen für unterschiedliche Nutzung in Form von betrieblichen Massnahmen. Dazu gibt es in der Literatur bereits erste Ansätze, die auch auf die ausgewählten Pilotstrecken in Zürich übertragen werden können.

Insbesondere Parkbuchten längs der Fahrbahn eignen sich z.B. für Anlieferungsgebiete (früh morgens), für Haltestellen oder Pick-up- bzw. Drop-off-Bereiche (zu den Spitzenstunden), für Marktstände oder Sitzmöglichkeiten (am Nachmittag) und für Abstellflächen von Fahrzeugen (in der Nacht) (National Association of City Transportation Official, 2017). Ein möglicher konkretisierter Vorschlag zur temporären Zuteilung von Verkehrsflächen wird in Kapitel 7.4.4 und Kapitel 8.1 skizziert.



**Abb. 63** Zeitlich differenzierte Nutzung von Flächen am Fahrbahnrand (National Association of City Transportation Official, 2017)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die primäre Möglichkeit zur Umwidmung von vorhandenen Verkehrsflächen durch Reduktion von Fahrstreifenbreiten aufgrund spurtreuen Fahrens nach dem momentanen Kenntnisstand erst bei 100 % AF möglich ist. Gleiches gilt für ein vollständiges Aufheben der innerstädtischen Parkplätze. Auch deshalb müssen für die Mischverkehrszustände entsprechende Übergangslösungen zur Nutzung der vorhandenen Verkehrsfläche gefunden werden oder alternativ mit regulatorischen und betrieblichen Massnahmen dieser Zustand zumindest möglichst kurzgehalten werden. Denkbare Themenfelder sind hierbei z.B.:

- aktive Verkehrssteuerung und Massnahmen im Bereich Verkehrsmanagement
- Zeitlich-räumliche Einschränkung in der Nutzung für verschiedene Verkehrsmittel
- Finanzielle Anreize zur Beeinflussung des Nutzerverhaltens (bspw. steuerliche Begünstigungen bei der Nutzung von automatisierten Fahrzeugen).
- zeitlich differenzierte Nutzungen vorhandener Flächen (dynamische Flächennutzung)

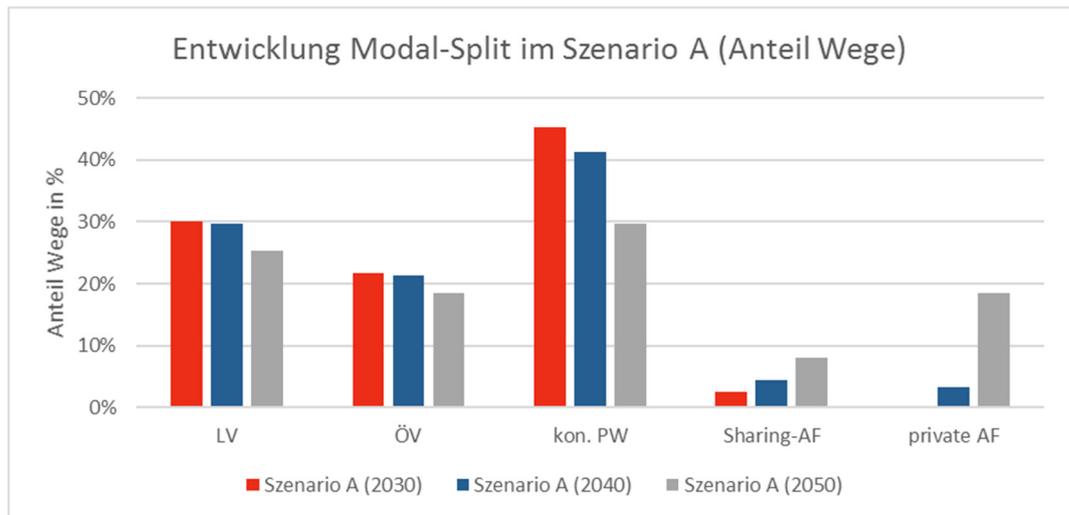
Von den gelisteten Möglichkeiten und Handlungsfeldern werden im Kapitel 7.4.4 und Kapitel 8.1 ausgewählte Massnahmen erläutert.

### **Einfluss von AF auf den ÖV-Anteil**

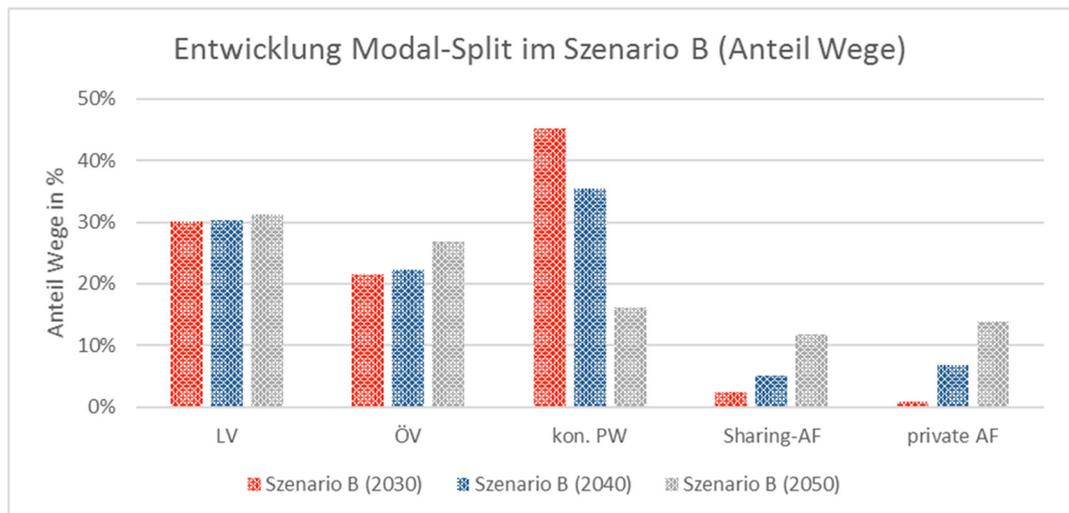
Ein weiterer Aspekt bzgl. der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems ist der Einfluss von AF auf den ÖV. Ein funktionierender und attraktiver ÖV ist ein wesentlicher Bestandteil eines funktionsfähigen Verkehrssystems. AF stehen jedoch zumindest teilweise in Konkurrenz zu diesem, da insbesondere Sharing-AF auf der sogenannten «letzten Meile» eine attraktive Alternative z.B. zum Bus bilden. Ein hoher Anteil Sharing-AF kann somit u.U. zur «Kannibalisierung» des ÖV führen, was wiederum eine Reduktion der ÖV-Fahrgastzahlen zur Folge hat und dessen Wirtschaftlichkeit, trotz Kosteneinsparungen durch die Automatisierung, gefährdet. Im gesteigerten Umfang kann davon der ländliche Raum mit einem (heute) beschränkten ÖV-Angebot betroffen sein (VDV Die Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), 2015). Gemäss Ackermann (Ackermann, et al., 2017) dürfte ohne flankierende Massnahmen ein Rückgang beim klassischen ÖPNV zu erwarten sein, da unter anderem ein privates AF komfortabler sein wird und zudem auch Menschen ohne Fahrerlaubnis

einen PW nutzen können. Ebenso ist allerdings denkbar, dass Sharing-AF je nach zukünftigen Betreibermodell ein Bestandteil des ÖV werden könnten und diesen sinnvoll erweitern (bspw. eine neue Erschliessung in der Fläche). Dem negativen Einfluss einer potenziellen Kannibalisierung des ÖV gilt es mit entsprechenden Massnahmen entgegenzuwirken. Mögliche Handlungsfelder werden in Kapitel 7.4.4 beispielhaft anhand der Pilotstrecken aufgezeigt.

Anhand des Modal Splits der Agenten lässt sich basierend auf den MATSim-Ergebnissen der beschriebene AF-Einfluss analysieren. Dazu wird die Entwicklung des Modal Splits im Teilraum Zürich für die beiden Szenarien A und B sowie die drei Zeitschritte (2030, 2040, 2050) ausgewertet und verglichen. Es wird der Anteil der Wege mit den Verkehrsmitteln LV (Fuss und Velo), ÖV, konventionelle PW, Sharing-AF und private AF berücksichtigt. Die folgenden Abbildungen zeigen das Verhältnis der Wege im Tagesverkehr je Verkehrsmittel und deren Entwicklung.



**Abb. 64** Entwicklung des Modal Split im Szenario A im Teilraum Zürich (Anteil der Wege)



**Abb. 65** Entwicklung des Modal Split im Szenario B im Teilraum Zürich (Anteil der Wege)

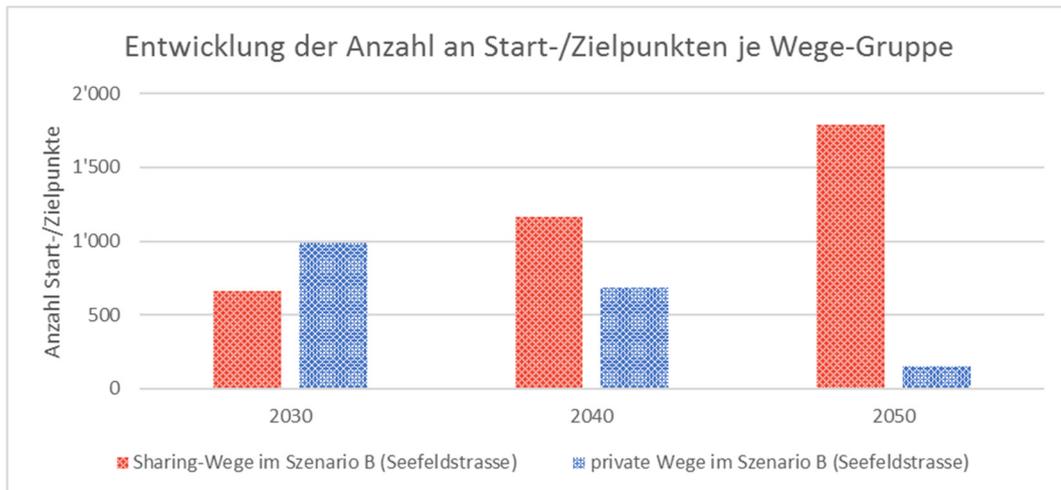
Die Auswertungen zeigen, dass sich der Modal Split im Verlauf der Zeit deutlich hin zu Wegen mit AF (privat und Sharing) verschiebt, wobei im Szenario A erst 2050 ein wesentlicher privater AF-Anteil erreicht wird und im Szenario B der Sharing-AF-Anteil deutlich höher ist als im Szenario A. Im Gegensatz dazu nimmt in beiden Szenarien der Anteil konventioneller PW-Wege ab. Interessant ist jedoch, dass im Szenario A auch der LV und ÖV, insbesondere 2050, Anteile an den Wegen verlieren. Im Hinblick auf die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems ist das keine erstrebenswerte Tendenz, da der ÖV als sehr flächeneffizientes und der LV als umweltschonendes Verkehrsmittel beide einen wichtigen Beitrag

zur Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems leisten. Im Szenario B steigen neben den AF auch die Anteile von LV und ÖV, was sich mit dem starken Rückgang der konventionellen Fahrzeugflotte erklären lässt. In beiden Szenarien wird im Jahr 2050 die Preissenkung des ÖV aufgrund der Automatisierung berücksichtigt, was die Attraktivität des ÖV in diesem Zeitschritt erhöht. Ohne diese Preisreduktion wären gemäss TP2 deutlich höhere MIV-Anteile zu erwarten. Im Vergleich der beiden Szenarien und im Hinblick auf die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems bildet Szenario B im Zusammenhang mit den aktuellen verkehrspolitischen Zielen (ARE, 2017) den zu bevorzugenden Fall ab.

### Einfluss von AF auf die Haltestelleninfrastruktur

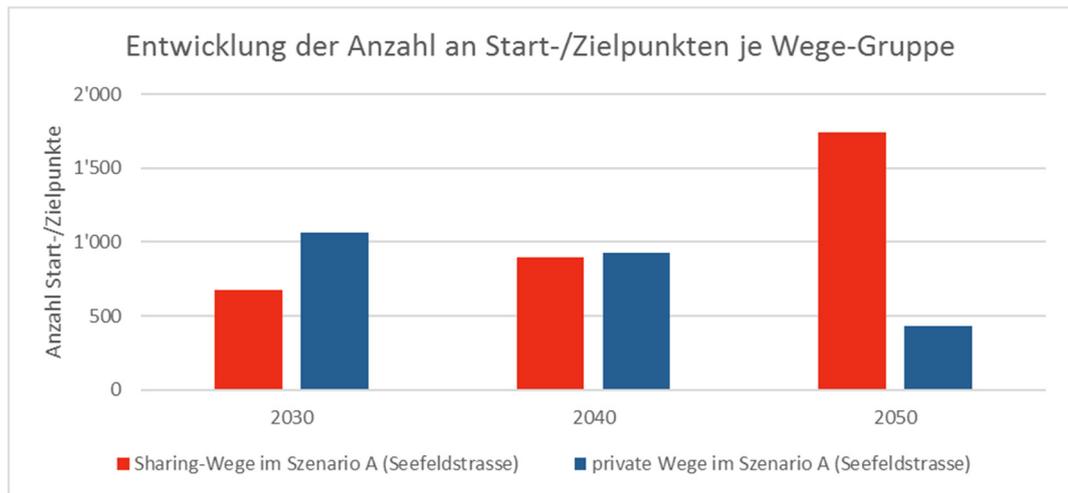
Neben den beschriebenen Modalverschiebungen zeigt sich auch in Bezug auf die erforderliche Haltestelleninfrastruktur ein Konflikt zwischen AF und ÖV. Beide Nutzungsformen benötigen Bereiche, in welchen Fahrgäste schnell und sicher ein- und aussteigen können. Bis zu einer gewissen Anzahl an AF kann dazu die bestehende ÖV-Haltestelleninfrastruktur genutzt werden. Im Zielszenario 2050 und bei Streckenabschnitten mit besonders vielen Start- und Zielpunkten automatisierter Fahrten wird die vorhandene Infrastruktur vermutlich nicht ausreichen und es besteht die Gefahr, dass der ÖV durch AF behindert oder aufgehalten wird.

Um die oben beschriebene These zu quantifizieren, werden beispielhaft für die Seefeldstrasse die Entwicklung der Anzahl an Ein- und Aussteiger über die Zeitschritte basierend auf den MATSim-Ergebnissen (TP2) ausgewertet. Dabei werden alle Wege, die im Bereich der Seefeldstrasse beginnen oder enden unter Berücksichtigung des genutzten Verkehrsmittels analysiert. Es wird zwischen sog. Sharing-Wege und privaten Wege unterschieden. Die Sharing-Wege sind Wege, welche Pick-up- oder Drop-off-Bereiche benötigen (Sharing-AF, private AF, Mitfahrer). Private Wege sind Wege, welche einen Parkplatz benötigen (konventionelle PW). In der folgenden Abbildung ist die Entwicklung der Anzahl an Start- und Zielpunkten je Wege-Gruppen im Bereich der Seefeldstrasse für das Szenario B abgebildet.



**Abb. 66** Entwicklung der Anzahl der Ein-/Aussteiger in der Seefeldstrasse (Szenario B)

Das Szenario A zeigt die gleichen Tendenzen, aber in geringerer Ausprägung.



**Abb. 67** Entwicklung der Anzahl der Ein-/Aussteiger in der Seefeldstrasse (Szenario A)

Die Auswertungen der Ein- und Aussteiger zeigen, dass im Verlauf der Zeit die Anzahl der Sharing-Wege deutlich zunimmt, was zu einer gleichermassen erhöhten Anzahl an Pick-up- und Drop-off-Bewegungen führt. Gleichzeitig gehen die privaten Wege zurück. Dies lässt auch Rückschlüsse auf die erforderliche Infrastruktur und Strassenrandnutzung zu, sodass zukünftig die heute vorhandenen Parkplätze vermehrt in Pick-up- und Drop-off-Bereiche umgewandelt werden müssen, um Nutzungskonflikte mit der bestehenden ÖV Haltestelleninfrastruktur zu vermeiden. Entsprechende Massnahmenvorschläge werden in den Kapiteln 7.4.3, 7.4.4 und 8.1 beispielhaft erläutert.

### Einfluss auf den Langsamverkehr

Die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems erfordert auch ein Funktionieren des Langsamverkehrs. Im Zusammenhang mit AF ist in Bezug auf den LV insbesondere die zukünftige Art der Kommunikation zwischen den Verkehrsteilnehmern zu lösen, da diese heute hauptsächlich visuell erfolgt und dies zukünftig bei AF nicht mehr möglich ist. Die Attraktivität und damit auch die Akzeptanz des Langsamverkehrs (insbesondere des Veloverkehrs) hängt auch mit dem Fahrkomfort und der subjektiven Sicherheit zusammen. Neben der Möglichkeit des Kommunizierens zwischen den Verkehrsteilnehmern ist auch der Abstand zwischen den Langsamverkehrsteilnehmern und dem MIV ein wichtiges Mass. Bei AF wird sich dieser Abstand in Längsrichtung (kurze Folgezeitzeitlücken) und in Querrichtung (spurtreues Fahren) verringern, was ohne Massnahmen einen negativen Einfluss auf die Attraktivität des Langsamverkehrs haben wird und durch eine daraus resultierende Modalverschiebung auch die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems gefährden kann.

Heinrichs (2015) geht davon aus; dass «die Trennungswirkung zunehmen und das Queren von Fahrspuren unter Bedingungen eines dicht fliessenden Verkehrs erschwert werden. Um die Vorteile des autonomen Fahrens für den Verkehrsfluss zu gewährleisten und gleichzeitig die «Durchlässigkeit» für den Fuss- und Radverkehr sicherzustellen, wäre die Anlage von kreuzungsfreien Querungen wie Über- oder Unterführungen eine notwendige Konsequenz». Eine solche räumlich/funktionale Trennung der einzelnen Verkehrsteilnehmer dürfte dem heutigen und unter Verkehrs- und Stadtplanern etablierten Planungsverständnis (Durchmischung) zuwiderlaufen und wäre eine Rückkehr zu einer Planungsphilosophie die der «autogerechten» Stadt» entspricht. Mögliche Handlungsfelder zur Vermeidung der beschriebenen Trennwirkungen werden in den Kapiteln 7.4.4 und 8.1 beispielhaft erläutert.

In Bezug auf den LV spielen auch die zukünftigen automatisierten Angebotsformen des GV eine wichtige Rolle. Mobile Stationen oder automatisierte Lieferroboter werden die gleichen Bereiche des Strassenraums wie der heutige LV nutzen. Um die Funktionsfähigkeit des Mischverkehr in Bezug auf den LV und die Mikromobilität ebenfalls zu gewährleisten sind auch in diesem Zusammenhang entsprechende Massnahmen erforderlich. Mögliche Ansätze zur Optimierung des Verkehrsablaufs und zur Berücksichtigung bei der kommunalen Strassenraumgestaltung werden im Kapitel 8.1 erläutert.

### 7.4.3 AF-induzierte Effekte bzgl. Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems

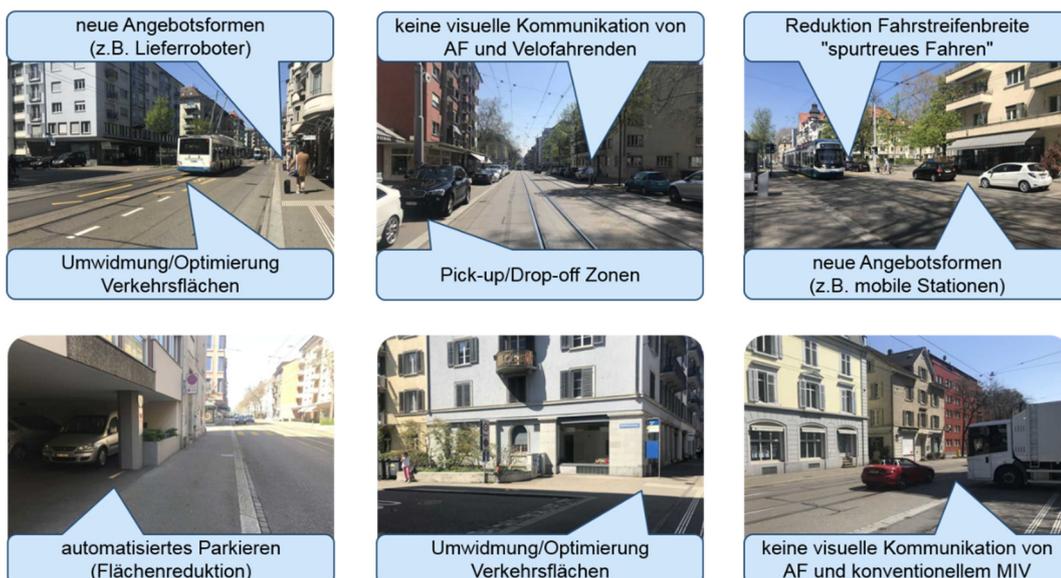
Die in Kapitel 7.4.2 beschriebenen Indikatoren und Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit in Bezug auf AF im Mischverkehr werden im Folgenden anhand der ausgewählten Pilotstrecken konkretisiert und die AF-induzierten Effekte beispielhaft erklärt. Dabei beziehen sich die dargestellten Abbildungen direkt auf die in Kapitel 7.2 vorgestellten heutigen Anforderungen/Aufgaben der jeweiligen Strasse.

#### Seefeldstrasse

In der Seefeldstrasse werden insbesondere die folgenden Effekte auf die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems erwartet:

- Bedarf an so genannten Pick-up-/Drop-off-Bereichen für automatisierte Fahrzeuge (private AF und Sharing-AF)
- Potenzial bzw. die Möglichkeit zur Anpassung der Fahrstreifenbreiten aufgrund spurtreuen Fahrens (neue Verteilung der Flächenverhältnisse MIV/ÖV/LV)
- Schaffung von Verkehrsflächen für neue Angebotsformen (im Fokus stehen Liefer- oder Entsorgungsroboter)
- Anpassung der Parkierungsflächen für automatisiertes Parken (Anpassung der Anzahl und deren Abmessung infolge exakter Fahrmanöver)
- Regelung der Interaktion zwischen den verschiedenen Verkehrsteilnehmern (automatisiert und konventionell) und der Infrastruktur (LSA)

Die oben genannten zusätzlichen Anforderungen an die Strasseninfrastruktur aufgrund von AF sind in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abb. 68** Übersicht AF-induzierter Effekte in der Seefeldstrasse

## Scheuchzerstrasse

In der Scheuchzerstrasse werden insbesondere die folgenden Effekte auf die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems erwartet:

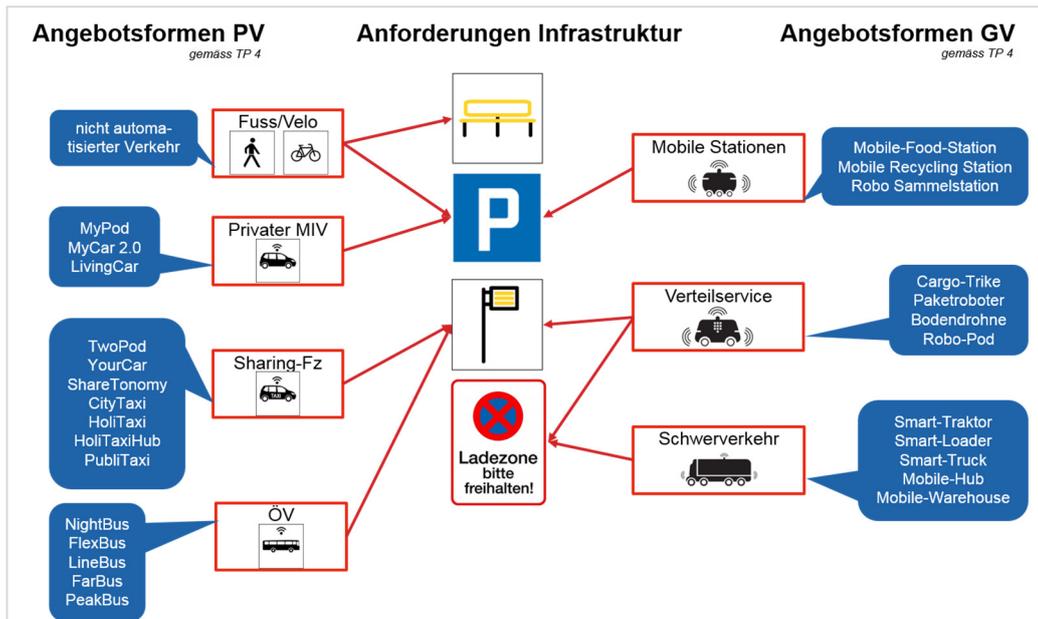
- Bedarf an so genannten Pick-up-/Drop-off-Bereichen für automatisierte Fahrzeuge (private AF und Sharing-AF)
- Potenzial bzw. die Möglichkeit zur Anpassung der Fahrstreifenbreiten aufgrund spurtreuen Fahrens (neue Verteilung der Flächenverhältnisse MIV/ÖV/LV)
- Schaffung von Verkehrsflächen für neue Angebotsformen (im Fokus stehen Liefer- oder Entsorgungsroboter)
- Anpassung der Parkierungsflächen für automatisiertes Parken (Anpassung der Anzahl und deren Abmessung infolge exakter Fahrmanöver)
- Regelung der Interaktion zwischen den verschiedenen Verkehrsteilnehmern (automatisiert und konventionell)

Die oben genannten zusätzlichen Anforderungen an die Aufgaben der Strasse aufgrund von AF sind in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abb. 69** Übersicht AF-induzierter Effekte in der Scheuchzerstrasse

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die automatisierten Fahrzeuge und auch die daraus resultierenden neuen Angebotsformen (vgl. dazu TP4 des vorliegenden Forschungsprojekts) neue bzw. zusätzliche Anforderungen an die Verkehrsinfrastruktur stellen. Dabei sind die Anforderungen je Angebotsform unterschiedlich, wobei bei allen Formen primär die vier Themenfelder Aufenthaltsfunktion, Parkierung, Ein-/Austeigen und Anlieferung betroffen sind. Die folgende Abbildung zeigt eine Übersicht über die Anforderungen je Angebotsform des TP4.



**Abb. 70** Übersicht infrastruktureller Anforderungen der Angebotsformen des TP4

### Autobahn A3 (Abschnitt Anschlussstelle Urdorf-Nord)

Auf der Autobahn A3 im Bereich der Anschlussstelle Urdorf-Nord werden insbesondere die folgenden Effekte auf die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems erwartet:

- Anpassung der Fahrstreifenbreiten aufgrund spurtreuen Fahrens
- Regelung der Interaktion zwischen den verschiedenen Verkehrsteilnehmern (automatisierter und konventioneller MIV) und der Infrastruktur (z.B. Knoten 4.0)
- Ausbildung von Adaptionstrecken für die Übernahme der Fahraufgabe bei Level 4-Fahrzeugen und einer möglichen AF-Perimetergrenze an der Schnittstelle zwischen Autobahn und nachgelagertem Netz
- Schaffung von sicheren Abstellflächen im Falle einer Nichtübernahme der Fahrtätigkeit durch den Fahrer.
- Erhöhung der vorhandenen Kapazität der Infrastruktur

Die oben genannten zusätzlichen Anforderungen an die Strasseninfrastruktur aufgrund von AF sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

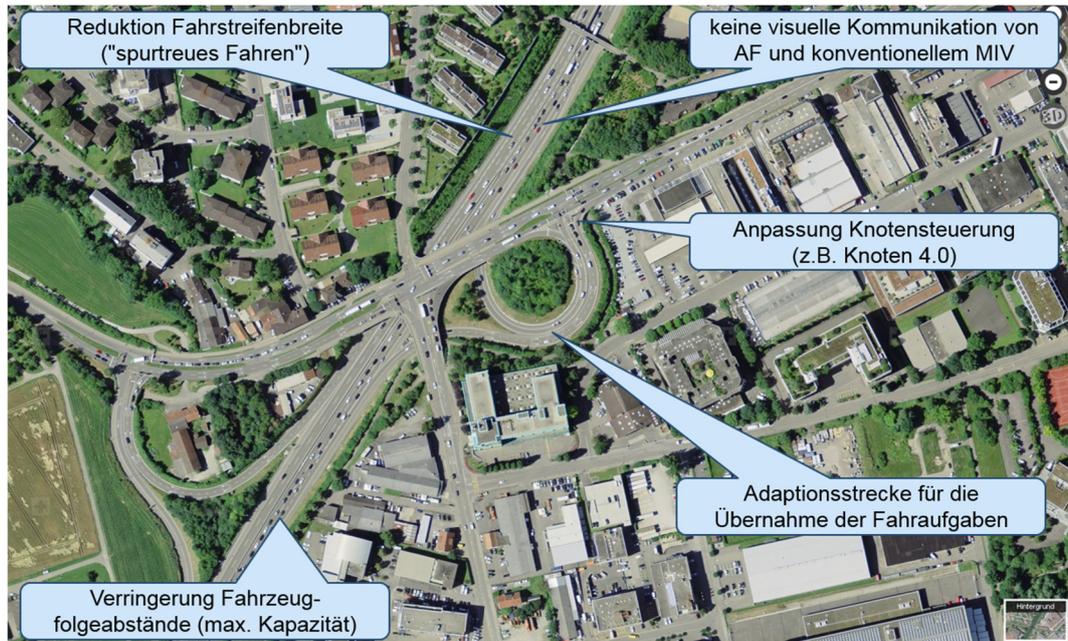


Abb. 71 Übersicht AF-induzierter Effekte im Bereich Urdorf-Nord

#### 7.4.4 Massnahmenfelder zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems

Basierend auf den Funktionen die eine Strasse (heute) hat und deren Änderungen aufgrund AF-induzierter Effekte, lassen sich erforderliche bzw. empfehlenswerte infrastrukturelle Massnahmen ableiten und skizzieren. Dabei besteht das grundsätzliche Problem, dass viele der sich abzeichnenden Vorteile durch AF (Reduktion der Unfälle, Verringerung des MIV-Flächenbedarfs) infolge des Mischbetriebs noch nicht vollständig erreicht werden oder teilweise noch gar nicht realisierbar sind. Insofern müssen die Massnahmen im Kontext des Mischverkehrs beurteilt werden und deren Umsetzung bzw. die sich daraus ergebenden positiven Effekte werden erst schrittweise im Hinblick auf einen sehr langen Zeithorizont erreicht. Im Folgenden werden für die Pilotstrecken jeweils einige Massnahmenfelder genannt. Eine ausführliche Erläuterung in Kombination mit Handlungsempfehlungen bzgl. der unterschiedlichen Massnahmen erfolgt in Kapitel 8.1.

##### Seefeldstrasse

###### Anpassung Markierung und Zuteilung

Das Vorhandensein einer lückenlosen und gut erkennbaren Markierung ist eine zentrale Voraussetzung für das automatisierte Fahren (vgl. Kapitel 3.4). Je nach Zuteilung der Fahrstreifen sind entsprechende Anpassungen der Markierung notwendig.

###### Reduktion/Neuzuteilung von Flächen

Die Möglichkeiten einer Reduktion von Fahrstreifenbreiten ist unter dem Aspekt des Mischverkehrs kaum umsetzbar. Hier bleibt das «bestimmende Element» das konventionell gesteuerte Fahrzeug mit seinen benötigten Sicherheits- und Bewegungszuschlägen. Realistischer Weise muss – solange konventionell gesteuerte Fahrzeuge im Einsatz sind – davon ausgegangen werden, dass eine Reduktion der Fahrstreifen nicht möglich sein wird.

###### Pick-up-/Drop-off-Bereiche (PUDO-Bereiche)

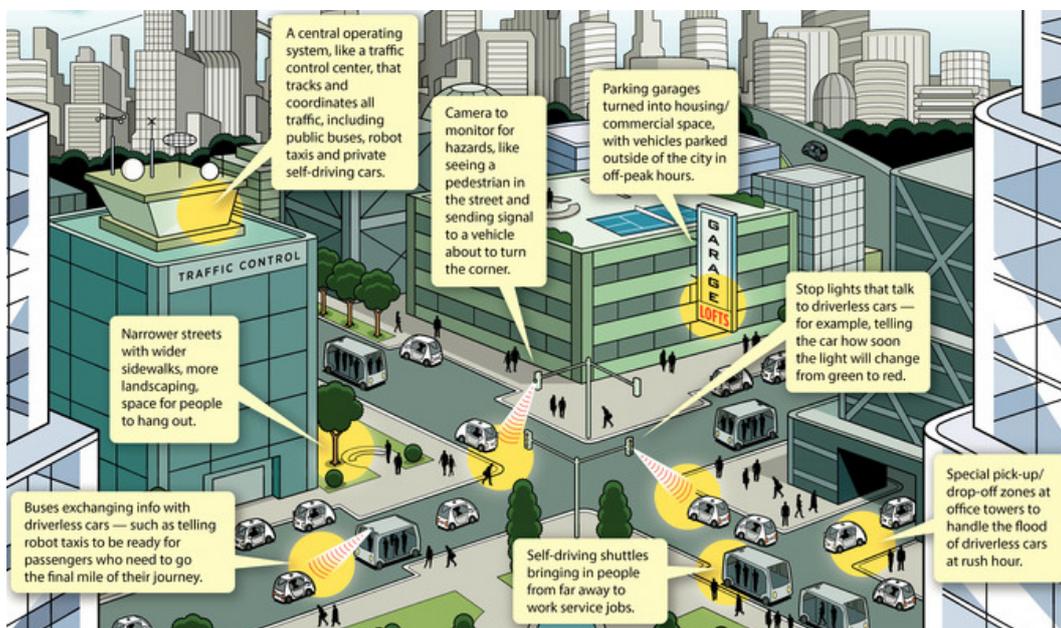
Pick-up-/Drop-off-Bereiche sind eine Voraussetzung um Personen mit AF ein- und aussteigen zu lassen. Dabei werden solche Bereiche sowohl für private AF benötigt (diese Fahrzeuge fahren dann in entsprechende Parkhäuser/Tiefgaragen) als auch für Sharing-AF (welche in diesen Bereichen weitere Kunden aufnehmen und dann zu einem anderen Einsteigebereich fahren).

### Dynamische Nutzung des Strassenrands

Im Hinblick auf die sehr starke Durchmischung unterschiedlicher Nutzungen in der Seefeldstrasse bietet sich die Möglichkeit, den Strassenrand tageszeitlich unterschiedlich zu nutzen. So wäre denkbar, in den Morgen- und Abendstunden die Pick-up-/Drop-off-Bereiche für die Anlieferung von Waren zu nutzen und danach für private und Sharing-AF. Während der Anlieferzeiten wäre die Nutzung für den Personenein- und -ausstieg entsprechend teurer als in den «Nebenzeiten». Damit liesse sich ggf. auch eine Schwächung des (ebenfalls automatisierten) ÖV mindern.

### Umsteigemöglichkeiten auf den ÖV

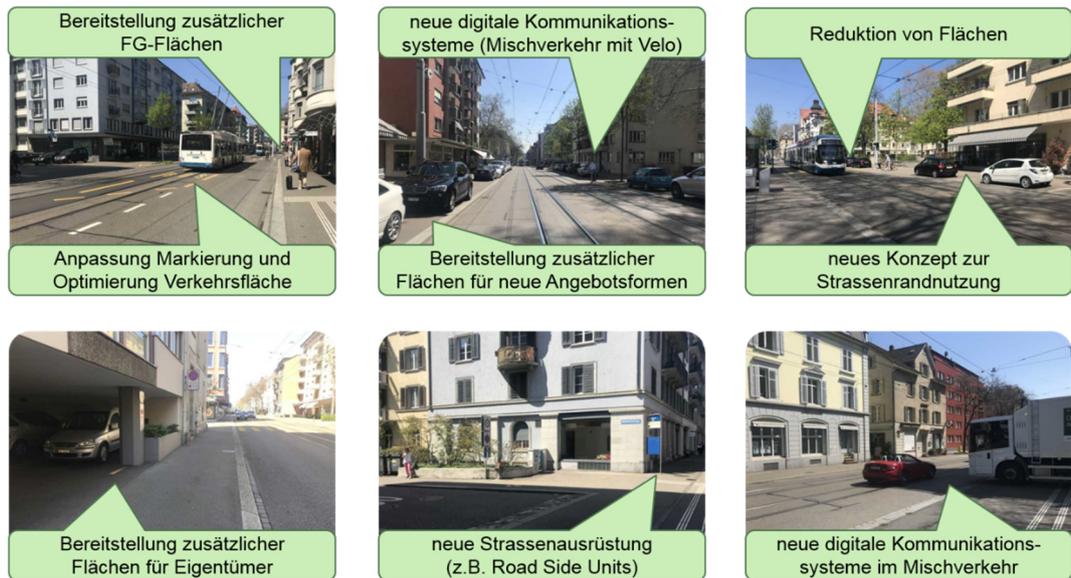
Die heutigen ÖV-Haltestellen sollten – zumindest für den Linienverkehr – beibehalten werden. Ist doch ein klarer Fahr- und Linienplan ein zentrales Zuverlässigkeitskriterium. Allerdings wird es zunehmend auch nachfragegesteuerte Sammeltaxis oder Kleinbusse geben. Diese sollten auch im «Mikrobereich» entsprechend räumlich flexibel an den Zielorten anhalten können. Für solche Fahrzeuge wären ergänzend (und in Kombination mit den Pick-up-/Drop-off-Bereichen) Haltebereiche vorzusehen. Untenstehende *Abb. 72* illustriert einen solchen Strassenraum.



**Abb. 72** Möglicher zukünftiger Verkehrsablauf im innerstädtischen Bereich (Higgins, 2018)

### Strassenausrüstung und digitale Kommunikation

Hierzu gehören verbesserte Verkehrslageinformationen und kommunikationsfähige LSA, welche mit einer geringen Latenzzeit mit den Fahrzeugen im Datenaustausch stehen. Ebenso sind für andere nicht automatisierte Verkehrsteilnehmer Informations- und Leittechniken notwendig. Dabei wäre eine Kommunikation oder Informationsweitergabe via Smartphone denkbar. Im Hinblick auf die Nutzung des ÖV sind hier zudem auch neue um weitere Informationen ergänzende Assistenzsysteme denkbar, welche beispielsweise Informationen zum Belegungsstand von Bussen liefern (vgl. hierzu das zurzeit laufende Forschungsprojekt U-hoch-3 («Unbeschwert urban unterwegs» am Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Systemtechnik der Universität Kassel). Gleiches gilt auch für das Parkraummanagement, welches durch zusätzliche Echtzeitdaten z.B. über die Auslastung von vorhandenen Einstellhallen, Optimierungspotenzial besitzt.



**Abb. 73** Übersicht möglicher Massnahmen in der Seefeldstrasse

### Scheuchzerstrasse

#### Anpassung Markierung und Zuteilung

Das Vorhandensein einer lückenlosen und gut erkennbaren Markierung ist eine zentrale Voraussetzung für das automatisierte Fahren (vgl. Kapitel 3.4). Je nach Zuteilung der Fahrstreifen sind entsprechende Anpassungen der Markierung notwendig.

#### Reduktion/Neuzuteilung von Flächen

Die Möglichkeit einer Reduktion von Fahrstreifenbreiten ist unter dem Aspekt des Mischverkehrs kaum umsetzbar. Hier bleibt das «bestimmende Element» das konventionell gesteuerte Fahrzeug mit seinen benötigten Sicherheits- und Bewegungszuschlägen. Realistischerweise muss – solange konventionell gesteuerte Fahrzeuge im Einsatz sind – davon ausgegangen werden, dass eine Reduktion der Fahrstreifen nicht möglich sein wird.

#### Pick-up-/Drop-off-Bereiche (PUDO-Bereiche)

Pick-up-/Drop-off-Bereiche sind eine Voraussetzung, um Personen mit AF ein- und aussteigen zu lassen. Dabei werden solche Zonen sowohl für private AF benötigt (diese Fahrzeuge fahren dann in entsprechende Parkhäuser/Tiefgaragen) als auch für Sharing-AF (welche in dem Bereich weitere Kunden aufnehmen und dann zu einem anderen Einsteigebereich fahren).

#### Dynamische Nutzung des Strassenrands

Im Hinblick auf die sehr starke Durchmischung unterschiedlicher Nutzungen in der Scheuchzerstrasse bietet sich die Möglichkeit, den Strassenrand tageszeitlich unterschiedlich zu nutzen. So wäre denkbar, in den Morgen- und Abendstunden die Pick-up-/Drop-off-Bereiche für die Anlieferung von Waren zu nutzen und danach für private und Sharing-AF. Während der Anlieferzeiten wäre die Nutzung für den Personenein- und -ausstieg entsprechend teurer als in den «Nebenzeiten». Damit liesse sich ggf. auch eine Schwächung des (ebenfalls automatisierten) ÖV mindern.



**Abb. 74** Übersicht mögliche Massnahmen in der Scheuchzerstrasse

### Autobahn A3 (Abschnitt Anschlussstelle Urdorf-Nord)

#### Adaptionsstrecken

In der Phase, in der noch nicht alle Strecken für AF freigegeben sein werden, muss eine genügend lange sog. Adaptionsstrecke vorhanden sein, um die sichere Übernahme der Fahraufgaben durch den Fahrer zu gewährleisten. Dabei zeigen Tests in Fahrsimulationen, dass die benötigte Zeit einer Übernahme bei 7 bis 8 Sekunden liegt (Vogelpohl, et al., 2018). Das ergäbe bei einer Ausfahrt mit einer Geschwindigkeit von 60 km/h eine Adaptionslänge von ca. 130 m (bei einer Übernahmezeit von 8 Sekunden).

#### Sichere Notfallbuchten/Notfallbereiche

Kann die Übernahme der Fahraufgaben durch den Menschen nicht übernommen werden, so muss das Fahrzeug in einen sicheren (für den Passagier und die anderen Verkehrsteilnehmenden) Bereich fahren können. Dies sollte nicht der Pannestreifen sein, da es sich nicht um ein defektes Fahrzeug handelt und ein solcher Bereich für den Passagier nicht optimal wäre, da ein allfälliger Wechsel auf ein anderes Fahrzeug dort nicht möglich ist. Ebenso muss berücksichtigt werden, dass der Pannestreifen (falls noch vorhanden, vgl. Kapitel 8.1) auch weiterhin für defekte konventionelle Fahrzeuge (und damit einhergehend den Pannefahrzeugen) uneingeschränkt zu Verfügung stehen müssen.

#### Separate Fahrstreifen für AF

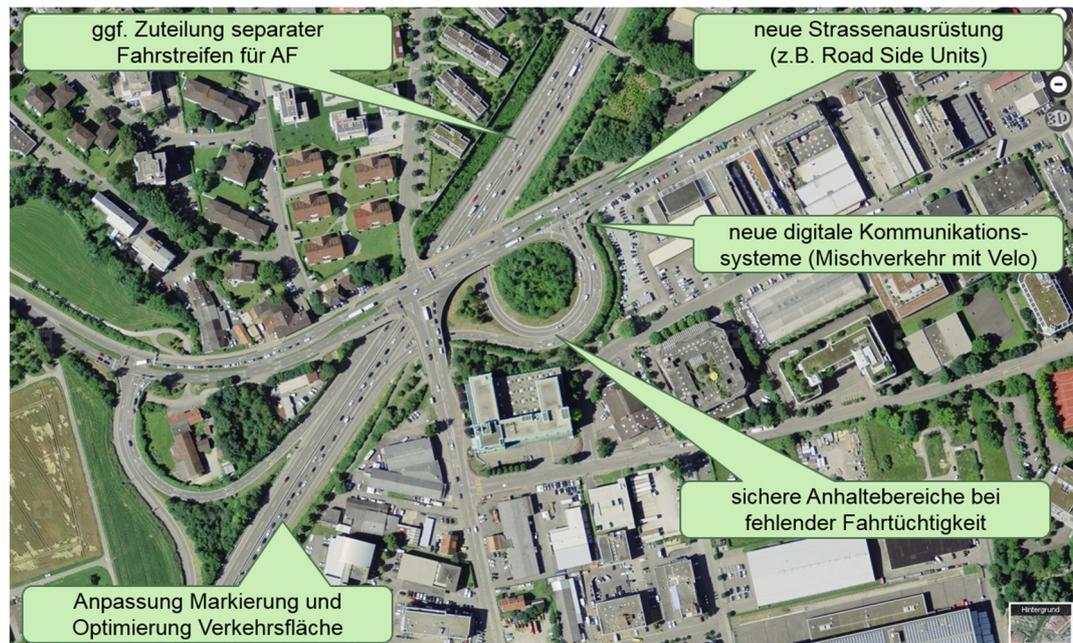
Im Hinblick auf die Durchdringung und den Anteil der AF am gesamten MIV-Aufkommen stellt sich die Frage, ob hier separate Fahrstreifen für AF sinnvoll und umsetzbar sind. Dabei wäre prüfenswert, ob unter Nutzung der Flächen des heutigen Pannestreifens ein separater Fahrstreifen für AF realisierbar wäre. Analog zur Pannestreifenumnutzung (PUN) wären dann alle 1'000 m eine Nothaltebucht für Fahrzeuge mit einer Panne vorzusehen. Ob aus Sicht des Verkehrsablaufs (insbesondere im Zusammenspiel mit den Ein- und Ausfahrten) ein solcher Fahrstreifen am äusseren oder inneren Fahrbahnrand anzuordnen wäre, müsste vertieft untersucht werden. Ein solch separater Fahrstreifen würde auch ein Maximum an Kapazitätssteigerung ermöglichen, da die «kapazitätsmindernden» konventionell gesteuerten Fahrzeuge nicht auf diesem Fahrstreifen wären. Eine Separierung verringert zudem die negativen Auswirkungen bzw. die Nachteile des Mischverkehrs in Punkto Sicherheit. Detaillierte Untersuchungen zu diesem Thema und dann auch erforderliche mikroskopische Verkehrssimulationen bieten ein grosses Potenzial für weiterführende Forschungen. (vgl. auch Kapitel 8.1.2)

### Anpassung Markierung und Zuteilung

Das Vorhandensein einer lückenlosen und gut erkennbaren Markierung ist eine zentrale Voraussetzung für das automatisierte Fahren (vgl. Kapitel 3.4). Je nach Zuteilung der Fahrstreifen zuteilung sind entsprechende Anpassungen der Markierung notwendig.

### Strassenausrüstung und digitale Kommunikation

Hierzu gehören auf der Autobahn insbesondere verbesserte Verkehrslageinformationen sowie kommunikationsfähige Streckenbeeinflussungsanlagen, welche mit einer geringen Latenzzeit mit den Fahrzeugen Daten austauschen. Mit Hilfe dieser Informationen können Fahrzeuge frühzeitig gelenkt werden, was zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit beitragen kann.



**Abb. 75** Übersicht möglicher Massnahmen im Bereich Urdorf-Nord

## 8 Handlungsempfehlungen und Grundlagen für die Wirkungsanalyse

### 8.1 Handlungsempfehlungen zuhanden der Infrastrukturbetreiber

Im Rahmen des TP5 wurden mögliche Migrationsszenarien erarbeitet die den Übergangszeitraum vom konventionellen zum automatisierten Fahren beschreiben. Mischverkehr findet nicht nur zwischen motorisierten Verkehrsteilnehmern mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden, sondern auch zwischen nicht motorisierten Verkehrsteilnehmern und automatisierten Fahrzeugen statt. Beide Formen des Mischverkehrs könnten im Hinblick auf die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems und in Bezug auf die Verkehrssicherheit zu kritischen Situationen führen. Mischverkehr zwischen motorisierten und nicht motorisierten Verkehrsteilnehmern gibt es bereits heute schon, aufgrund der bevorstehenden Einführung von AF ist diese Thematik jetzt aber besonders relevant, da automatisierte Fahrzeuge eine neue Verkehrsform darstellen, die u.U. Verhaltensweisen aufweisen, die sich von den bisherigen Verkehrsteilnehmern unterscheiden. Aus diesem Grund ist es jetzt angezeigt, Massnahmen einzuleiten, um auch während des komplexer werdenden Mischverkehrszustands mit AF die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems aufrecht zu erhalten und die zukünftigen Mobilitätsbedürfnisse effizient und auf einem möglichst hohen Sicherheitsniveau abwickeln zu können. Dabei ist schon jetzt erkennbar, dass in der Phase des Mischverkehrs die durch die Automatisierung erhofften positiven Effekte noch nicht so stark ausgeprägt sein werden, wie sie durch eine vollständige Automatisierung des Verkehrs erwartet werden. In den Kapiteln 7.3.5 und 7.4.4 wurden bereits getrennte Massnahmenfelder in Bezug auf die Sicherheit und auf die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems genannt. In den folgenden Kapiteln werden diese Massnahmenfelder systematisiert und vertieft sowie konkrete Handlungsempfehlungen für Massnahmen erarbeitet, die funktions- und sicherheitskritische Situationen im Mischverkehr möglichst dezimieren. Darüber hinaus könnten die Vorteile der Automatisierung im Mischverkehr mithilfe der vorgeschlagenen Massnahmen stärker genutzt werden, was über lange Zeit zu Effizienzsteigerungen im Verkehr führen könnte.

Diese Ziele decken sich auch mit den vom UVEK erstellten Orientierungsrahmen «Zukunft Mobilität Schweiz 2040» (ARE, 2017).<sup>3</sup> Darin sind u.a. die folgenden Ziele festgehalten:

- Das Gesamtverkehrssystem der Schweiz 2040 ist in allen Aspekten effizient (Hauptziel)
- Bei der Anwendung von Innovationen im Bereich der Mobilität nimmt die Schweiz eine internationale Spitzenposition ein. (Ziel 1)
- Eine klar definierte Grundversorgung stellt eine zeitlich und räumlich angemessene Erreichbarkeit in allen Regionen des Landes und für alle Bevölkerungsgruppen sicher. (Ziel 4)
- Die Verkehrsnachfrage wird so gelenkt, dass die Leistungsfähigkeit des bestehenden Gesamtverkehrssystems vor der Realisierung von weiteren Aus- oder Neubauten ausgeschöpft wird. (Ziel 5)

<sup>3</sup> Die genannten Schweizer Ziele decken sich auch gut mit den Zielen der New Urban Agenda (Habitat III, 2016), die ebenfalls keine Rückkonversion zur autogerechten Stadt vorsehen und eine effiziente, sichere und nachhaltige Mobilität anstreben sowie die Infrastruktur sanft und fortlaufend weiterentwickeln wollen.

Ähnliche Ziele sind auch für die Kantone und Städte in der Schweiz formuliert. Beispielhaft werden entsprechende Ziele für Zürich (Kanton Zürich, 2018) genannt:

- Optimieren der Erreichbarkeit urbaner Räume und Erhaltung der Erreichbarkeit nicht urbaner Räume im Personenverkehr (Hauptziel 1: Optimierung Verkehrsangebot)
- Gleichmässigere Auslastung der Strassen und der Angebote im ÖV (Hauptziel 2: Steuerung Verkehrsnachfrage)
- Verbessern der Siedlungsverträglichkeit des Strassenverkehrs (Hauptziel 4: Vermindern des Ressourcenverbrauchs und der Belastung von Mensch und Umwelt)

Aufbauend auf den genannten Zielen und unter Berücksichtigung der Fragestellen im Rahmen des TP5 werden die folgenden Themenfelder definiert, um mit Massnahmen in diesen Bereichen die Situation im Mischverkehr zu verbessern.

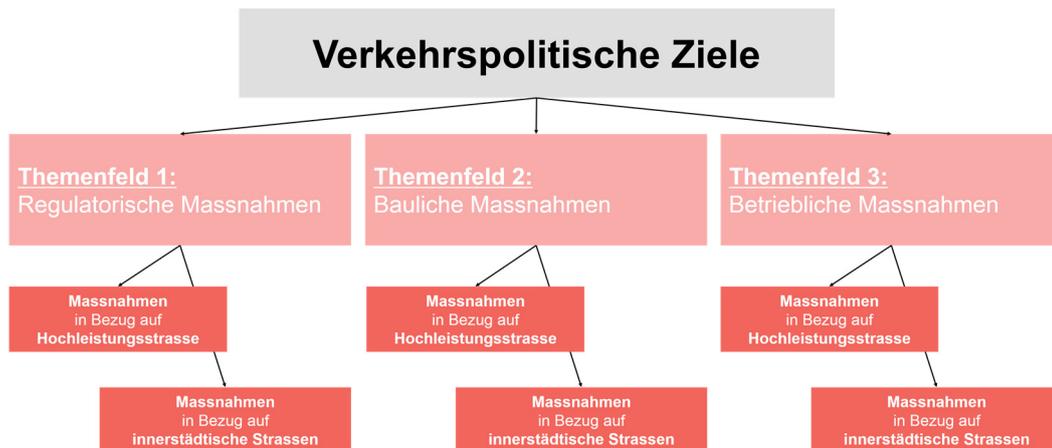
- Themenfeld 1:  
Weiterentwicklung der bestehenden Regeln, Normen und gesetzlichen Vorgaben im Umgang mit dem automatisierten Fahren und den Herausforderungen im Mischverkehr
- Themenfeld 2:  
Neue Zuteilung der verfügbaren Verkehrsflächen und erforderliche Anpassung/Ausrüstung dieser unter Berücksichtigung der zukünftigen Angebotsformen und der gesellschaftlichen sowie raum- und stadtplanerischen Anforderungen
- Themenfeld 3:  
Beeinflussung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems und der Verkehrssicherheit mithilfe neuer Technologien und Datenquellen

Die drei Themenfelder können abkürzend auch in regulatorische (Themenfeld 1), bauliche (Themenfeld 2) und betriebliche (Themenfeld 3) Massnahmen gegliedert werden. In Bezug auf die zeitliche Umsetzung der Themenfelder sind als erstes die regulatorischen Massnahmen anzugehen (kurzfristiger Zeithorizont), um so die Voraussetzungen für bauliche Massnahmen zu schaffen (langfristiger Zeithorizont) und die Rahmenbedingungen für betriebliche Massnahmen festzusetzen (mittelfristiger Zeithorizont). Aus diesem Grund werden die drei Themenfelder im Folgenden in der genannten Reihenfolge abgehandelt. Die Massnahmen in den drei genannten Themenfeldern unterscheiden sich zudem je Netzelement und Strassentyp. Aus diesem Grund werden die drei Themenfelder getrennt für Hochleistungsstrassen und innerstädtische Strassen beschrieben.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Die Massnahmen auf Hauptverkehrsstrassen ausserorts bilden eine Kombination aus den beschriebenen Massnahmen auf Hochleistungsstrassen und städtischen Strassen und werden deshalb nicht explizit aufgeführt.

Die folgende Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen den verkehrspolitischen Zielen, den drei Themenfeldern und den Massnahmen je Strassentyp.



**Abb. 76** Übersicht verkehrspolitische Ziele – Themenfelder – Massnahmen

Die folgende Abhandlung der möglichen Massnahmen und damit verbundenen Handlungsempfehlungen bilden einen Auszug aus vielen denkbaren Ansätzen und stellen einen ersten Überblick bzgl. der möglichen Massnahmen dar. Für alle Themenfelder und in Bezug auf die Handlungsempfehlungen besteht darüber hinaus ein weiterer Forschungsbedarf sowie die Notwendigkeit einer detaillierten Ausarbeitung der Ansätze.

### 8.1.1 Regulatorische Massnahmen

#### Weiterentwicklung der bestehenden Regeln, Normen und Gesetze im Umgang mit dem automatisierten Fahren und den Herausforderungen im Mischverkehr

Bevor automatisierte Fahrzeuge auf Schweizer Strassen in den Normalbetrieb (keine Testfelder und Pilotanwendungen) gehen bzw. erste Streckenabschnitte oder Strassentypen für AF freigegeben werden können, müssen neue Regeln im Umgang mit AF definiert und bestehende Normen und Richtlinien angepasst werden, um einen einheitlichen und den politischen Zielen entsprechenden Umgang mit AF zu gewährleisten. Im folgenden Abschnitt werden entsprechende regulatorische Massnahmen vorgeschlagen, damit die vorab definierten Ziele erreicht werden können. Die Massnahmen beziehen sich ausschliesslich auf verkehrsplanerische Themen und fokussieren auf Herausforderungen im Mischverkehr, rechtliche oder wirtschaftliche Aspekte werden hierbei nicht berücksichtigt. Die Massnahmen für Hochleistungsstrassen und innerstädtische Strassen werden auch aufgrund der unterschiedlichen Zuständigkeiten zwischen Bund und Kantonen/Gemeinden getrennt behandelt.

#### Hochleistungsstrassen

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsberichts wird davon ausgegangen, dass die HLS grundsätzlich als erstes für AF freigegeben werden, da diese die dort herrschenden Fahr-situationen als erstes beherrschen werden (vgl. Kapitel 5). Im Detail ist aber noch zu definieren, ob bestimmte Voraussetzung erfüllt sein müssen, damit AF auf Schweizer HLS fahren können. Entsprechende Abklärungen sind in enger Abstimmung mit den Automobilherstellern und den Entwicklungen im europäischen Ausland durchzuführen. Sollten in diesem Zusammenhang zusätzliche bauliche Massnahmen an der HLS erforderlich werden, ist zu regeln, in welcher Reihenfolge die HLS ertüchtigt werden sollen. Für diesen Entscheid spielt das Potenzial für eine AF-Nutzung je Streckenabschnitt eine wesentliche Rolle. Neben der Freigabe der Strassen für AF ist auch zu gewährleisten, dass beim Verlassen des AF-Perimeters ein gesicherter Wechsel der Fahrfunktion von automatisierter auf konventionelle Fahrkontrolle stattfinden kann. Die dafür ggf. erforderlichen baulichen und betrieblichen Massnahmen sind in den beiden Kapiteln 8.1.2 und 8.1.3 beschrieben.

Unabhängig davon wie die genaue Übergabe der Fahrfunktion vom System an den Fahrer aussieht, gilt es zu regeln, welche Verbindungsqualität zwischen den AF-Perimetern und den konventionellen Bereichen erreicht werden soll. Die Anzahl und Entfernung der einzelnen Schnittstellen zwischen AF-Perimeter und nicht AF-Perimetern ist dabei massgebend zum Erreichen der gewünschten Verbindungsqualität und in Abhängigkeit dieser zu definieren. Je weniger Schnittstellen zwischen den beiden Perimetern vorhanden sind, desto wahrscheinlicher sind Umwegfahrten auf Wegen mit AF, die eine nicht gewünschte Erhöhung der Fahrleistung zur Folge haben könnten.

Sowohl die Strassenfreigabe, als auch die erreichte Verbindungsqualität besitzen Auswirkungen auf die Angebotsqualität von AF und damit auch auf das Nutzungspotenzial. Ein funktionales Netz ist in allen Phasen des Mischverkehrs zwingend erforderlich, um die Diffusion der neuen Technologie zu ermöglichen. Mit entsprechenden betrieblichen Massnahmen (vgl. Kapitel 8.1.3) ist es denkbar, dass sich dieses Netz auch dynamisch im Tagesverlauf ändert, was jedoch zusätzliche Informationsmassnahmen für alle Verkehrsteilnehmer erforderlich macht und einen Ausbau der Verkehrszustandsüberwachungs-massnahmen bedingt.

### **Innerstädtische Strassen (Hauptverkehrsstrassen, Erschliessung- und Sammelstrassen)**

Auf innerstädtischen Strassen werden im Zuge der Automatisierung verschiedene neue Angebotsformen (vgl. TP4) entstehen. Diese besitzen unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile und Dynamik in ihrem Verhalten. Es wird empfohlen vor der Zulassung von z.B. TwoPods oder Bodendrohnen zu regeln, in welchen Bereichen des Strassenquerschnitts diese optimalerweise unterwegs sind. Dabei ist sowohl der Mischverkehr zwischen den neuen Angebotsformen als auch zu den bestehenden Verkehrsmitteln zu betrachten. Sinnvollerweise sind im innerstädtischen Strassenraum verhaltenshomogene Verkehrsformen (ähnliche Geschwindigkeit und Beschleunigung) in einem gemeinsamen Bereich in Längsrichtung unterwegs und insbesondere die schwächeren Verkehrsteilnehmer von schnelleren geschützt. Dabei soll jedoch eine bauliche Trennung der Verkehrsströme möglichst vermieden werden, um ein Queren der Verkehrsströme zu ermöglichen und die Ziele der kommunalen Strassenraumplanung (Nutzungsmischung) zu erreichen; vgl. z.B. Ziele des Kantons Zürich (Kanton Zürich, 2018). Zudem sind Aufenthaltsbereiche für Fussgänger und mobile Stationen so zu definieren, dass diese den jeweiligen Anforderungen entsprechen und gleichzeitig andere Verkehrsformen nicht beeinträchtigt werden. In diesem Zusammenhang sind auch die benötigten und freizuhaltenden Lichtraumprofile für die neuen Angebotsformen zu definieren und bestehende Normalprofile aufgrund der Automatisierung anzupassen, damit der Strassenraum entsprechend der Nutzerbedürfnisse optimal gestaltet werden kann. Sollte ein bestehender Strassenquerschnitt nicht ausreichen, um den Mischverkehr zwischen allen Angebotsformen abzuwickeln, wäre eine Sperrung gewisser Bereiche für einzelne Angebotsformen denkbar (Aufenthalts- und Fahrfunktion). In welchem Umfang und nach welcher Systematik eine Strassensperrung möglich und verkehrlich sinnvoll ist, wäre im Rahmen von weiteren Studien zu prüfen. Dazu sind gezielte Szenarien mithilfe von begründeten Annahmen zu entwickeln und zu berechnen, sodass möglichst konkrete Effekte auf das Verkehrssystem berechnet werden können.

Durch AF im Bereich der bedarfsgesteuerten Mobilität wird innerstädtisches Parken vermehrt durch kurzzeitiges Halten (Ein- und Aussteigen von Personen oder Be- und Entladen von Gütern) ersetzt. Für diese Haltevorgänge sind Regeln aufzustellen, um die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems zu gewährleisten. Dabei ist insbesondere die zulässige Dauer, die räumliche Verteilung und die Anzahl der Haltemöglichkeiten zu definieren, damit darauf aufbauend die erforderlichen PUDO-Bereiche dimensioniert werden können. Beide Kriterien sind massgebend für die Attraktivität der jeweiligen Angebotsform und können je nach Funktion der Strasse und auch in Abhängigkeit der Belastung und Tageszeit variabel gestaltet werden, um die vorhandene Infrastruktur bzw. den verfügbaren Platz möglichst effizient zu nutzen.

## Massnahmen unabhängig von Strassentyp

Neben regulatorischen Massnahmen in Bezug auf die Strasseninfrastruktur sind auch Regeln in Bezug auf die Fahrzeuggestaltung und Zulassung möglich, um den Mischverkehr optimal abzuwickeln. AF sind durch menschliche Fahrer nur bedingt identifizierbar. Dies könnte problematisch werden, wenn ein Fahrer eines konventionellen Fahrzeugs ein AF nicht erkennt und deshalb ein menschliches Fahrverhalten erwartet, was bei ihm ggf. eine andere Reaktion als bei der Begegnung mit einem AF auslöst. Aus diesem Grund kann es hilfreich sein, dass AF eindeutig gekennzeichnet werden z.B. durch andere Nummernschilder oder Markierungen auf dem Fahrzeug. Dies macht es für nicht automatisierte Verkehrsteilnehmer einfacher AF zu identifizieren, deren Verhalten zu verstehen und sich entsprechend zu verhalten.

In der Phase des Mischverkehrs, in der noch nicht alle Strassen für AF freigegeben sind und der Passagier das Lenken des Fahrzeugs u.U. übernehmen muss, gilt es zu klären, ob dann bereits Nutzergruppen ohne Fahrausweis (z.B. Kinder) bzw. nicht fahrtüchtige Personen (z.B. alkoholisierte Personen) ein AF ohne Begleitung einer fahrberechtigten bzw. fahrtüchtigen Person nutzen dürfen und wie beim Verlassen des AF-Perimeters sichergestellt wird, dass das Fahrzeug in einen sicheren Zustand überführt wird, ohne dass vermeidbare zusätzliche Fahrzeugkilometer das Verkehrssystem belasten. Eine Massnahme zur Lösung dieses Problems wäre eine Authentifizierung des potenziellen Fahrers bzw. die Prüfung der Fahrtüchtigkeit vor Fahrtbeginn und eine entsprechend eingeschränkte Zielwahl auf Ziele, die innerhalb eines AF-Perimeters liegen.

Im Zusammenhang mit dem Mischverkehr gilt es auch, den Fall von Fahrzeugen mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad zu berücksichtigen. So ist es wahrscheinlich, dass verschiedene Generationen von konventionellen oder automatisierten Fahrzeugen besser miteinander kommunizieren und Informationen austauschen, wenn sich deren Automatisierungsgrade auf einem ähnlichen Niveau befinden. Das gilt insbesondere auch für AF (L4/L5) mit unterschiedlich aktuellen Softwarepaketen, da davon auszugehen ist, dass sich auch AF weiterentwickeln und entsprechend die Software aktualisiert wird. Um dieses Kommunikationsproblem zu minimieren wäre eine Nachrüstung der Fahrzeuge mit einem niedrigen Automatisierungsgrad mit sog. On-Board-Systemen denkbar, um so die Datenaustauschmöglichkeiten zwischen den unterschiedlichen Fahrzeuggenerationen zu verbessern und die Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems im Mischverkehr zu steigern. Gleiches gilt für auch Softwareupdates, die in einem zu definierenden zeitlichen Zyklus durchzuführen wären. Entsprechende Regeln sind im Zuge der Fahrzeugzulassung von AF und der Strassenfreigabe für entsprechende Fahrzeuggruppen unterschiedlicher Automatisierungsgrade festzulegen. Dabei spielt auch die Datensicherheit/-hoheit eine wichtige Rolle (vgl. TP3).

Die Technologie des automatisierten Fahrens ermöglicht neue Verkehrsformen wie z.B. AF-Sharing, automatisierter MIV, Leerfahrten von AF. Diese werden den heutigen Modal Split beeinflussen (vgl. Kapitel 7.4). Ohne klare Regeln und entsprechende Kontrollen sowie falls erforderlich einem staatlichen Eingriff, besteht die Gefahr, dass die Ziele einer flächeneffizienten und nachhaltigen Mobilität nicht erreicht werden. Diese Entwicklung könnte darin begründet liegen, dass durch AF der MIV attraktiver wird und so der LV und ÖV an Attraktivität verlieren, was im Widerspruch zu den heutigen verkehrspolitischen Zielen der Städte steht (Kanton Zürich, 2018). Aus diesem Grund ist regulatorisch eine gewünschte Angebotsqualität je Verkehrsmittel zu definieren, um das Mischverkehrsverhältnis zwischen den unterschiedlichen Verkehrsformen dahingehend zu beeinflussen. Eine Möglichkeit ist in diesem Zusammenhang, die staatliche Förderung bzw. Beschleunigung der AF-Durchdringung in der Fahrzeugflotte z.B. durch ein frühzeitiges Ersetzen der Fahrzeugflotte der öffentlichen Hand mit AF oder einer Subventionierung des AF-Fahrzeugkaufs. Darüber hinaus sind auch verschiedene betriebliche Massnahmen zur Beeinflussung der AF-Durchdringung denkbar (vgl. Kapitel 8.1.3).

Weitere Themen, die im Zusammenhang mit AF zu regulieren sind und ebenfalls einen Einfluss auf die Angebotsqualität von AF und damit verbunden auf den Mischverkehrsanteil besitzen, sind die Folgenden:

- Tempobeschränkungen für AF in Abhängigkeit des Stasstentyps oder Streckenbelastung
- Eine exklusive Freigabe für ausgewählte Streckenabschnitte entweder nur für konventionelle Fahrzeuge oder ausschliesslich für AF
- eine Subventionierung von Fahrten mit Sharing-AF und eine Begrenzung von AF-Leerfahrten
- Verhaltensanweisung für AF, die der Optimierung des Verkehrsflusses dienen
- Definition eines psychologisch getriebenen Mindestabstands für AF (Friedrich, 2015)

Die genannten Aspekte besitzen alle ein grosses Beeinflussungspotenzial in Bezug auf die zukünftige Abwicklung der Mobilität. Zudem sind diese auch verkehrspolitisch sehr brisant und deshalb mit den verkehrsplanerischen Zielen und Strategien der Städte, Kantone und des Bundes abzugleichen bzw. diese sogar dahingehend zu erweitern. In jedem Fall wird empfohlen diese Themenfelder zu bearbeiten und nach Möglichkeit zu lösen, bevor die ersten Strecken für AF freigegeben werden.

## 8.1.2 Bauliche Massnahmen

### **Neue Zuteilung der verfügbaren Verkehrsflächen und erforderliche Anpassung/Ausrüstung dieser unter Berücksichtigung der zukünftigen Angebotsformen und gesellschaftlichen Anforderungen**

Im Zusammenhang mit der Einführung des automatisierten Fahrens gilt es auch die bestehende Infrastruktur anzupassen und zu ertüchtigen. Dabei sind die erforderlichen Massnahmen auf den Hochleistungsstrassen und im städtischen Bereich teilweise sehr unterschiedlich und werden im Folgenden deshalb getrennt abgehandelt.

#### **Hochleistungsstrassen**

Bei der Betrachtung von AF auf der HLS wird eine mögliche Reduktion der Fahrstreifenbreite aufgrund des spurtreuen Fahrens als grosser Vorteil genannt (Heinrichs, 2015). Im Mischverkehr ist diese Reduktion jedoch nicht möglich, solange AF und konventionelle Fahrzeuge den gleichen Fahrstreifen nutzen. Bei dreistreifigen HLS besteht die Möglichkeit, einen Fahrstreifen für konventionelle Fahrzeuge zu sperren und so einen Fahrstreifen ausschliesslich für AF auszubilden, welcher schmaler ist und auf welchem AF auch mit geringeren Fahrzeugfolgeabständen fahren können, was zu Kapazitätsgewinnen führt (Krause, et al., 2017). Es wird empfohlen dafür den linken Fahrstreifen als automatisierten Fahrstreifen zu nutzen, da sonst konventionelle Fahrzeuge beim Ein- und Ausfahren auf die HLS den reinen AF-Strom queren müssten, was aufgrund der geringen Fahrzeugfolgeabstände nicht möglich ist (ein Auflösen der kurzen Fahrzeugfolgeabstände im Anschlussbereich ist insbesondere im städtischen Umfeld mit sehr hohen Anschlussdichten nicht zielführend). Eine Nutzung des rechten Fahrstreifens ausschliesslich für AF wäre nur in Bereichen mit einem hohen Anteil an automatisiertem Güterverkehr vorteilhaft, da dieser dann ebenfalls von den kurzen Fahrzeugfolgeabständen profitieren könnte. Anhand von mikroskopischen Verkehrssimulationen auf einem konkreten HLS-Abschnitt unter Berücksichtigung der erwarteten Belastungen und Verkehrsbeziehungen könnte im Rahmen von zukünftigen Studien geprüft werden, welcher Fahrstreifen sich im Einzelfall besser als Fahrstreifen für AF eignen würde.

Das Hauptproblem bei der Anlage eines separaten Fahrstreifens für AF ist jedoch, dass es in der Schweiz nur sehr wenige dreistreifige HLS-Abschnitte gibt und zwar vor allem dort, wo sie aus Verflechtungs- oder Vorsortiergründen nötig sind. Das Aufheben des Pannestreifens zur Schaffung eines separaten Fahrstreifens für automatisierte Fahrzeuge wird von Seiten des ASTRA zum heutigen Zeitpunkt als nicht zielführend erachtet (Fehlen eines Pannestreifens im Fall von Fahrzeugpannen und Unterhaltsarbeiten).

Eine weitere Thematik ist die Führung des automatisierten GV. Diese gilt es ebenfalls im Rahmen von weiteren Studien und unter anderem mittels mikroskopischen Simulationen detaillierter zu untersuchen und auch in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen für jeden Streckenabschnitt individuell zu prüfen.

Einen Sonderfall in der Schweiz stellen die wenigen einstreifigen HLS-Abschnitte dar. Dort wird aufgrund der teilweise nicht vorhandenen physischen Fahrbahntrennung, der schmalen Strassenquerschnitte und der im Vergleich geringen Verkehrsbelastung die Anlage eines separaten Fahrstreifen für AF nicht empfohlen. Diese Strassentypen müssten infrastrukturell wie Hauptverkehrsstrassen ausserorts behandelt werden.

Die beschriebene gestaffelte Freigabe der unterschiedlichen Strassentypen für AF (Kapitel 5) erfordert klare Übergabebereiche zwischen den unterschiedlichen Fahr-funktionen (konventionelles und automatisiertes Fahren). Die Grenzen zwischen den sogenannten AF-Perimetern (Abschnitte in welchen automatisiert gefahren werden kann) sind je Zeitschritt unterschiedlich und können aufgrund Verkehrsmanagementmassnahmen auch tageszeitlich unterschiedlich sein. In der ersten Phase des Mischverkehrs (ab 2030) werden die AF-Perimeter überwiegend im Bereich der Schnittstelle zwischen HLS und nachgelagertem Netz enden (Übergabebereiche innerhalb des nachgelagerten Netzes werden rein betrieblich gelöst und im Kapitel 8.1.3 behandelt). Bei der Einfahrt in den AF-Perimeter ist die Übergabe der Fahrfunktion an das Fahrzeug unkritisch, da eine durch das Fahrzeug signalisierte Übernahmemöglichkeit des Fahrens durch den Fahrer bestätigt werden kann und das Fahrzeug dann automatisiert fährt. Beim Verlassen des AF-Perimeters ist die Übernahme durch den Fahrer kritischer, da sichergestellt werden muss, dass der Fahrer die Fahrfunktion auch übernimmt bzw. übernehmen kann, sodass drei kritische Fälle denkbar sind:

- Der Fahrer will die Fahrfunktion nicht übernehmen bzw. ist nicht aufmerksam und bemerkt nicht rechtzeitig nach einer entsprechenden Vorwarnzeit, dass er die Fahrfunktion übernehmen muss.
- Der Fahrer kann die Fahrfunktion nicht übernehmen, da er fahruntüchtig ist oder u.U. gar keine Fahrerlaubnis besitzt.
- Der Fahrer benötigt zusätzliche Zeit bei der Übernahme und kann die herrschende Verkehrssituation nicht schnell genug erkennen und/oder reagiert nicht angemessen.

Für alle Fälle müssen Lösungen gefunden und Massnahmen ergriffen werden, damit die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems und die Verkehrssicherheit stets gewährleistet sind. Dazu können neben regulatorischen und betrieblichen Massnahmen (vgl. dazu Kapitel 8.1.1 und 8.1.3) auch zusätzliche Flächen und damit verbundene bauliche Anpassungen der Infrastruktur erforderlich werden. Ergänzend zu den beiden genannten verkehrlich kritischen Fällen wird zudem empfohlen, AF möglichst auch in intermodale Wegeketten zu integrieren, um eine effiziente und nachhaltige Mobilität zu fördern (Ridesharing, Pooling, Umstieg in flächeneffiziente Verkehrsmittel an der Stadtgrenze, usw.). Dies bedingt die Anlage von Umsteigemöglichkeiten auf andere Verkehrsmittel (sog. Hubs), die optimalerweise an AF-Perimetergrenzen liegen, um dort den Umstieg von AF auf andere Verkehrsmittel, insbesondere im Fall einer Fahruntüchtigkeit für konventionelles Fahren, zu ermöglichen. In diesem Zusammenhang gilt es zu prüfen, ob bestehende P+R-Anlagen entsprechend umgestaltet werden können oder die AF-Perimetergrenzen so definiert werden, dass möglichst wenig neue Umsteigehubs gebaut werden müssen, um den Flächenverbrauch zu reduzieren.

Zur Vorbereitung der Strassenfreigabe für AF wird deshalb empfohlen bestehende umwandelbare oder noch freie Flächen zu identifizieren, die sich für sog. Hubs eignen, wobei die Anzahl dieser Hubs in Abhängigkeit der angestrebten Erreichbarkeitsqualität zu definieren ist. Dabei sind die folgenden Anforderungskriterien berücksichtigen:

- Lage in der Nähe eines HLS-Anschlusses, sodass auch bereits in der ersten Phase des Mischverkehrs (ab ca. 2030) bis zum Hub automatisiert gefahren werden kann.
- Anbindung der Hubs an das bestehende ÖV-Netz
- Ermöglichung des Umstiegs auf Mikromobilität (Scooter, Velo, Pods, usw.) und Anbindung an ein entsprechend ausgebautes und attraktives Netz.
- Verknüpfung der Hubs mit dem (automatisierten) Güterverkehr zum Umschlag (Abholung) von Gütern und Nutzung der «Belly-Fracht» Kapazitäten der PW zum Transport von Gütern.
- Lage der Hubs in der Nähe von attraktiven Zielen für Arbeiten und Freizeit, um zusätzlichen Verkehr zu vermeiden.

Die gelisteten Anforderungen zeigen bereits die grosse Herausforderung geeignete freie Flächen zu finden, sodass der Fokus auf verkehrliche Anlagen gelegt werden sollte, die nur geringe Umbaumassnahmen erfordern oder bereits einige Anforderungen erfüllen und sich deshalb als Hubs eignen (z.B. P+R an Bahnhöfen oder Car-Pooling Parkplätze in der Nähe von HLS-Anschlüssen). In Abhängigkeit der Dichte der Hubs, der erwarteten Fahrten bzw. Umsteigevorgänge und der verfügbaren Fläche sind in einem nächsten Arbeitsschritt die genaue Ausstattung und Grösse dieser Hubs zu dimensionieren. Aus verkehrlicher Sicht und insbesondere im Mischverkehr besitzen die sog. Hubs die primäre Aufgabe den Übergang zwischen AF und konventionellem Fahren bzw. anderen Verkehrsmitteln zu gewährleisten, wenn ein Wechsel der Fahrfunktion während der Fahrt nicht möglich ist.

### **Innerstädtische Strassen (Hauptverkehrsstrassen, Erschliessung- und Sammelstrassen)**

AF im städtischen Umfeld ermöglichen eine Reduktion der erforderlichen Stellplatzgrösse bzw. eine höhere Fahrzeugdichte pro Parkieranlage, da AF präziser und somit platzsparender einparken können. Die Abstände zwischen den Fahrzeugen können auch dadurch minimiert werden, dass kein Platz zum Aussteigen von Fahrern bzw. Passagieren mehr erforderlich ist, da diese vor dem Parkiervorgang das Fahrzeug verlassen können; zudem sind auch keine permanenten Fahrgassen erforderlich, da AF individuell von extern umgeparkt werden können. Die Parkflächen können zudem räumlich flexibler angeordnet werden, da sich diese nicht mehr in der unmittelbaren Nähe der Zielorte befinden müssen (AF parkt selbstständig). Beide genannten Aspekte führen dazu, dass bestehende Parkieranlagen besser ausgelastet und Parkplätze im öffentlichen Strassenraum umgenutzt werden können. In diesem Zusammenhang gilt es in folgenden Studien die genaue Parkplatzsituation in den Städten bzw. im Bereich wichtiger Ziele zu analysieren und den zukünftigen Parkplatzflächenbedarf sowie dessen räumliche Verteilung genauer zu analysieren, sodass die freiwerdende Parkplatzfläche im öffentlichen Strassenraum quantifiziert werden kann. Bei Neubauten von Parkieranlagen ist zu prüfen, ob diese auch unter Berücksichtigung von AF noch nutzbar (Anpassung des Parkinglayouts) oder überhaupt notwendig sind. Insbesondere für die Phase des Mischverkehrs gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass weiterhin auch konventionelle Fahrzeuge im Netz unterwegs sind, die nach wie vor Stellplätze benötigen. Unter diesem Aspekt ist auch eine Aufteilung der Parkieranlagen für AF und konventionelle Fahrzeuge zu prüfen. Hierzu sind im Grundsatz zwei mögliche Ansätze denkbar:

- Vertikale (ggf. zeitlich dynamische) Zuteilung einzelner Bereiche in Parkhäusern und Tiefgaragen zur Parkierung von AF oder konventionellen Fahrzeugen
- Fixe oder zeitlich dynamische Zuteilung der ganzen Parkieranlage zur Parkierung von AF oder konventionellen Fahrzeugen

Zum beschriebenen Thema der Parkierungsanlagen und der entsprechenden detaillierten Umgestaltungsmöglichkeiten (z.B. Themen Zufahrt und AF-Parkinglayout) sind weitere Studien erforderlich, die die noch offenen Fragen klären sollten. Allgemein gilt, dass sich die aus den unterschiedlichen neuen Nutzungen ergebende Flächenbilanz immer abhängig vom AF-Anteil in der Flotte und im Netz ist. Regulatorische Eingriffe und die Förderung von politischen Zielen und Strategien sind dabei wichtige Steuerungselemente, die das Verhältnis zwischen AF-Parking und konventionellen Stellplätzen beeinflussen.

Die durch die reduzierten Parkflächen gewonnen Flächen sind insbesondere für neue Pick-up- und Drop-off-Bereiche zu nutzen, da diese für den Betrieb der Sharing-AF erforderlich sind. Auch hier ist die Anzahl und Verteilung der PUDO-Bereiche in Abhängigkeit der gewünschten Erreichbarkeitsqualität zu definieren und deren Grösse und Gestaltung in Bezug auf die Sharing-Flottengrösse sowie die erwartete Anzahl an Ein- und Aussteigern zu dimensionieren. Beides ist durch neue Regeln und Normen zu definieren und im Rahmen entsprechender Projekte zu erarbeiten.

Ein weiterer zusätzlicher Flächenbedarf entsteht durch neue Angebotsformen im Rahmen von Mikromobilität, insbesondere auch durch Mobilestationen und kleinräumige Verteilungsdienste des Güterverkehrs. Diese werden sich zukünftig im Trottoirbereich bewegen, so dass dieser entsprechend auszuweiten ist. (Schmitt, et al., 2019)

Eine innerstädtische Reduktion der Verkehrsflächen des motorisierten Verkehrs durch z.B. spurtreues Fahren oder kapazitätssteigernde Effekte der AF wird im Mischverkehr nicht möglich sein, da die verbleibenden konventionellen Fahrzeuge nach wie vor vorhanden sind. Einzelne Fahrstreifen ausschliesslich für AF analog der HLS werden höchstens in Ausnahmefällen möglich sein, da längere mehrstreifige innerstädtische Strassenabschnitte in der Schweiz unüblich sind, bzw. die Innenstädte die hierfür notwendige Strassenbreiten nicht ausweisen. Zur Anlage von innerstädtischen Fahrstreifen für AF sind betriebliche und regulatorische Massnahmen erforderlich, die eine temporäre Anpassung der Verkehrsführung bedingen und dadurch temporäre Fahrstreifen ausschliesslich für AF ermöglichen.

Die oben beschriebene Umverteilung der Flächen und die damit verbundene Flächenbilanz wird nicht in allen Bereichen funktionieren. Es wird Bereiche geben in welchen nicht alle Verkehrsträger im vorhandenen Strassenquerschnitt zwischen der Bebauung Platz haben. In diesen Fällen gilt es, entsprechend betrieblich oder regulatorisch einzugreifen, um die Funktionsfähigkeit und Verkehrssicherheit auch im Mischverkehr zu gewährleisten (vgl. Kapitel 8.1.1 und 8.1.3).

Neben der Neuverteilung der vorhandenen Flächen und den damit verbundenen baulichen Massnahmen ist innerstädtisch auch eine Nachrüstung der vorhandenen technischen Infrastruktur erforderlich, um den Mischverkehr insbesondere mit dem nicht motorisierten Verkehr sicher abzuwickeln. Dafür sind z.B. Unterflursignale für Fussgänger und Velofahrer eine mögliche Erweiterung, die die Informationen zur Verkehrssituation oder bzgl. des Verhaltens der anderen Verkehrsteilnehmer, die den AF durch Sensorik zur Verfügung stehen, an die nicht motorisierten Verkehrsteilnehmer weitergeben. Ebenso sind die vorhandenen LSA und Wechselverkehrszeichen entsprechend so nachzurüsten, dass diese mit den automatisierten Fahrzeugen Daten austauschen können, um die vorhandene Informationen aus Fahrzeugdaten zur Verkehrslage optimal verwenden zu können (vgl. TP3).



**Abb. 77** Beispiel von virtuellen Querungsstellen für Fussgänger (NBC, 2017)

### Massnahmen unabhängig vom Strassentyp

Unabhängig vom Strassentyp ist eine flächendeckende Zustandserfassung von Strasse, Verkehrssituation und Umgebung (z.B. Störung, Witterung) anzustreben, um den Verkehrsablauf optimal zu steuern und nicht nur die AF mit möglichst umfassenden Informationen auszustatten, um den Verkehrsfluss optimal beeinflussen zu können. Dazu sind eine Erweiterung der vorhandenen Sensorik und ggf. auch zusätzliche Road-Side-Units erforderlich. In diesem Zusammenhang ist auch eine vollständige digitale Karte (sogenannte High Definition (HD)- Karten) des Strassennetzes zu erstellen und stets auf dem neuesten Stand zu halten, welche den AF als weitere Informationsquelle zur Verfügung steht. Welche Sensorik und Daten im Detail erforderlich sind oder verwendet werden können, lässt sich aufgrund der noch nicht abschliessend geklärten Fahrzeugtechnik nicht beantworten. Auch deshalb ist die Anlage von Testfeldern bzw. Pilotstrecken für AF sehr empfehlenswert, um das Zusammenspiel von Fahrzeug- und Infrastrukturtechnik zu testen. Dies gilt nicht nur für die HLS, sondern auch für das innerstädtische Netz. Im Rahmen von Pilotanwendungen sind insbesondere auch die Besonderheiten im Schweizer Strassenverkehr im Zusammenspiel mit AF im Mischverkehr zu prüfen (z.B. Begegnungszonen, Hochgebirgsstrassen, Grenzübergänge, Zollabfertigung, Mautstationen, usw.). Es wird empfohlen Räume oder Strassenabschnitte zu identifizieren, welche sich für Pilotanwendungen für AF eignen und dort insbesondere auch kritische Mischverkehrssituationen zu testen.

Die folgenden Kriterien sollen helfen entsprechende Bereiche zu finden:

- Abdeckung möglichst vieler unterschiedlicher Verkehrssituationen im Testgebiet
- Bereits hoher vorhandener technischer Ausrüstungsgrad der Infrastruktur zur Erfassung der Verkehrssituation und Information der Verkehrsteilnehmer
- Berücksichtigung aller Verkehrsmodi und auch des Güterverkehrs
- Abdeckung von Besonderheiten im Schweizer Strassennetz

Viele der beschriebenen baulichen Massnahmen erfordern ergänzend zur eigentlichen Anpassung auch begleitende betriebliche Massnahmen zur Gewährleistung bzw. Optimierung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems und der Verkehrssicherheit. Zudem ist festzustellen, dass solange noch nicht automatisierte Fahrzeuge im Netz unterwegs sind, keine wesentlichen Flächengewinne durch die Automatisierung erreicht werden können, da die konventionellen Fahrzeuge nach wie vor relativ breite Fahrstreifen benötigen. Aus diesem Grund sind insbesondere die betrieblichen Massnahmen, die im folgenden Kapitel beschrieben werden, wesentlich, um auch im Mischverkehr ein möglichst gut funktionierendes Verkehrssystem bereitstellen zu können.

### 8.1.3 Betriebliche Massnahmen

#### Beeinflussung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems und der Verkehrssicherheit mithilfe neuer Technologien und Datenquellen

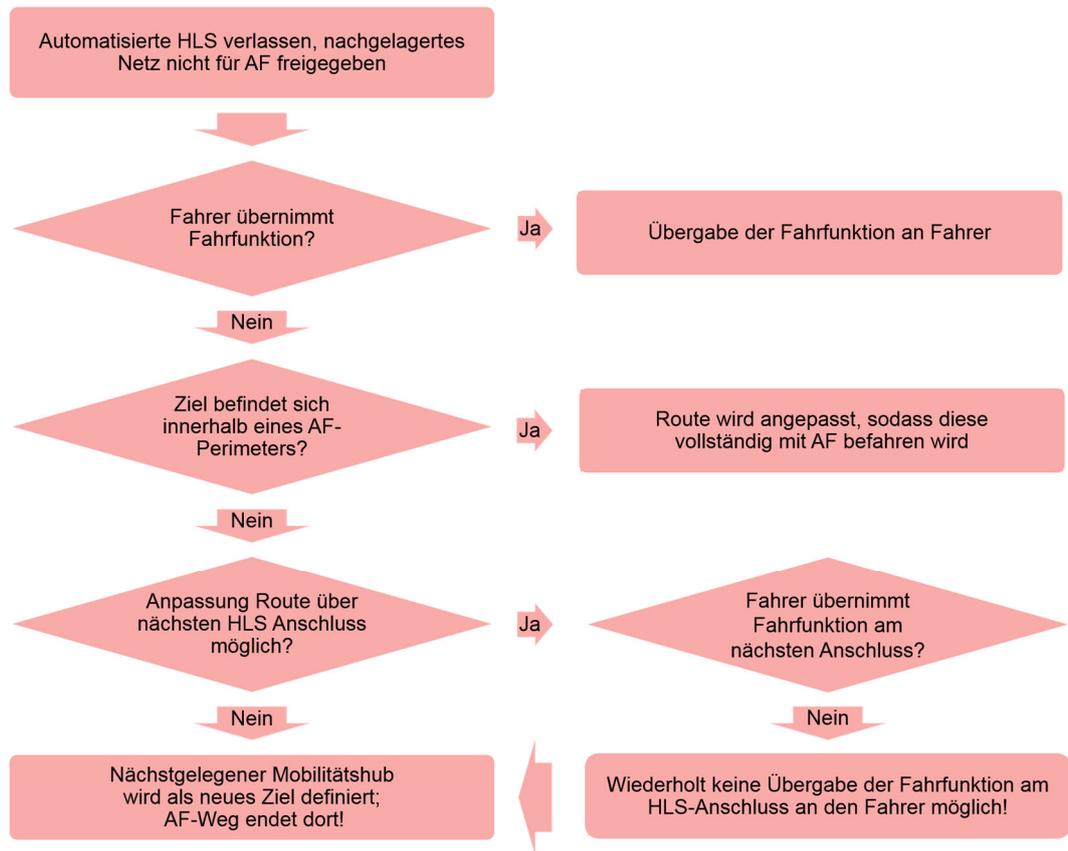
Durch die Einführung des automatisierten Fahrens und insbesondere im Zustand des Mischverkehrs zwischen AF und konventionellen Fahrzeugen werden die Abwicklungsmöglichkeiten der Mobilität durch die neue Technologie vielfältiger und es ergeben sich Chancen den Verkehrsablauf zu optimieren und nachhaltiger zu gestalten. Gleichzeitig wird das Verkehrssystem jedoch auch komplexer und die Gewährleistung der Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems dadurch herausfordernder. Um weiterhin die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems und eine entsprechende Verkehrssicherheit gewährleisten zu können sind verschiedene betriebliche Massnahmen erforderlich, die das Mobilitätsverhalten der Nutzer beeinflussen und so gestalten, dass die verkehrspolitischen Ziele möglichst optimal erreicht werden können. Eine Auswahl an empfehlenswerten Massnahmen zur Erreichung dieser Ziele werden im Folgenden getrennt für Hochleistungsstrassen und innerstädtischen Strassen beschrieben und deren Notwendigkeit und Effekte erläutert.

#### Hochleistungsstrassen

Ein wichtiger Aspekt zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems und der Verkehrssicherheit ist die betriebliche Regelung der Übergabebereiche zwischen konventionellem und automatisiertem Fahren. Ein wesentlicher Aspekt sind die unter Kapitel 8.1.2 beschriebenen Hubs. Diese können jedoch nicht an allen AF-Perimetergrenzen gebaut werden, insbesondere weil sich diese Grenzen über die Zeitschritte verlagern und optimalerweise auch tageszeitlich dynamisch steuerbar sind. Aus diesem Grund ist auch betrieblich zu regeln, wie die beschriebenen kritischen Fälle (Fahrer kann oder will die Fahrfunktion nicht übernehmen) gelöst werden. Exemplarisch wird dazu die folgende Strategie unter Anwendung verschiedener betrieblicher Massnahmen vorgeschlagen (Annahme: keine technischen Einschränkungen). Detaillierte Untersuchungen sind diesbezüglich noch erforderlich, jedoch gibt das Beispiel einen Überblick über die Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten zur Gewährleistung eines sicheren und funktionierenden Verkehrsablaufs.

#### Beispielszenario:

Ein AF soll gemäss Zielwunsch und Routenvorschlag die automatisiert befahrene HLS verlassen, wobei das nachgelagerte Strassennetz an der vorgesehenen Ausfahrt noch nicht für AF freigegeben ist. In diesem Fall wird die Übernahme der Fahrfunktion durch den Fahrer erforderlich. Es wird geprüft, ob der Fahrer fahrtüchtig ist (Fahrausweis, kein Alkoholkonsum etc.) und wenn dies der Fall ist, dieser rechtzeitig zur Übernahme aufgefordert. Falls der Fahrer die Fahrfunktion nicht übernehmen kann oder diese nicht übernimmt, wird geprüft, ob sich das Ziel auf anderem Weg, unter ausschliesslicher Nutzung von für AF freigegebenen Strecken, erreicht werden kann und die Route wird entsprechend angepasst. Falls sich das Ziel ausserhalb eines AF-Perimeters befindet bleibt das Fahrzeug auf der HLS und versucht am nächsten HLS Anschluss erneut die Fahrfunktion zu übergeben. Gelingt dies erneut nicht, wird der nächste erreichbare Hub zum Umsteigen auf ein anderes Verkehrsmittel angesteuert und die AF-Fahrt endet dort. Die beschriebene Strategie und der daraus folgende Ablauf sind in der folgenden Grafik zusammengefasst:



**Abb. 78** Vorschlag: Betrieblicher Ablauf zur Rückgabe der Fahrfunktion an den Fahrer

Anhand dieser einfachen betrieblichen Logik kann sichergestellt werden, dass die Fahrt zeitnah (ohne grosse Verlustzeit und zusätzliche Fahrzeugkilometer) endet und der AF-Nutzer sicher das AF verlassen kann sowie die Möglichkeit besitzt, seinen Weg mit einem anderen Verkehrsmittel fortzusetzen. Die vorgeschlagene Basisstrategie lässt sich unter Berücksichtigung verkehrspolitischer und verkehrsplanerischer Ziele modifizieren, sodass eine Nichtübernahme der Fahrfunktion entsprechend sanktioniert wird (z.B. Busse in Abhängigkeit der Umwegfahrt, Verkehrssituation, Tageszeit, usw.) oder direkt bei einer gescheiterten Übernahme durch den Fahrer der nächste Hub angesteuert wird. Eine genaue Festlegung der Strategie, die Möglichkeiten zur Routenbeeinflussung und die zu ergreifenden Massnahmen sind in vertieften Studien zu erarbeiten.

### Innerstädtische Strassen (Hauptverkehrs, Erschliessung- und Sammelstrassen)

Auf dem innerstädtischen Strassennetz besitzen AF gegenüber nicht automatisierten Verkehrsteilnehmern einen Informationsvorsprung aufgrund ihrer Fähigkeit, untereinander und mit der Verkehrsinfrastruktur Daten über z.B. die aktuelle Verkehrslage, Umleitungen, Sperrungen, geplante Routen, etc. auszutauschen. Diese zusätzlichen Informationen, die aufgrund der Kommunikation der Verkehrsteilnehmer zur Verfügung stehen, sollten auch den anderen Verkehrsteilnehmern zur Verfügung gestellt werden, um deren Verhalten ebenfalls zu beeinflussen. Ziel ist es, im Rahmen von Verkehrsmanagementmassnahmen die Verkehrsnachfrage und das vorhandene Verkehrsangebot durch situationsgerechte betriebliche Massnahmen aufeinander abzustimmen. Solange noch wenig kommunizierende Fahrzeuge im Netz unterwegs sind, sind zusätzliche Messquerschnitte zur Erfassung des Verkehrszustands im Netz erforderlich, um umfassende betriebliche Verkehrsmanagementmassnahmen umzusetzen. Eine Optimierung des Verkehrsflusses durch entsprechende betriebliche Massnahmen ist bei einem hohen Anteil von AF im Netz sehr gut möglich, da dann anhand vordefinierter Strategien die einzelnen AF durch eine übergeordnete Instanz (hoheitliche Aufgabe) so im Netz verteilt werden können, dass wahlweise ein Nutzer- oder ein Systemoptimum erreicht werden kann und somit auch bei möglichst hohen Belastungen die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems gewährleistet werden kann.

Durch entsprechende Informationsmassnahmen in Bezug auf die nicht automatisierten Verkehrsteilnehmer kann theoretisch eine entsprechende Beeinflussung der Verkehrsteilnehmer auch im Mischverkehr erreicht werden. Mögliche betriebliche Massnahmen in diesem Zusammenhang wären:

- tageszeitliche und belastungsabhängige Zuteilung der Verkehrsflächen zu den unterschiedlichen Verkehrsformen (z.B. durch flexible Strassenrandnutzungen, wechselnde Anzahl an Fahrstreifen je Fahrtrichtung).
- dynamische Wegweisung und Routenwahl in Abhängigkeit der Tageszeit oder ausgelöst durch Sondersituationen (z.B. Unfall, Ferienzeit).
- Sperrung bzw. Freigabe von Streckenabschnitten für einzelne Verkehrsformen (z.B. AF, Sharing-AF oder auch innerstädtischer GV zur Feinverteilung), wenn parallele Streckenabschnitte vorhanden sind und somit die Erreichbarkeit für die betroffenen Verkehrsteilnehmer durch die Streckensperrung nicht zu sehr eingeschränkt wird (z.B. parallele Kantonsstrasse und HLS)

Damit die genannten betrieblichen Massnahmen auch im Mischverkehr funktionieren ist es wichtig, die nicht automatisierten Verkehrsteilnehmer umfassend und rechtzeitig zu informieren, sodass diese zum einen ihren Weg entsprechend planen können und zum anderen, dass die Massnahmen auch eine möglichst hohe Akzeptanz finden. Die vorgeschlagenen und möglichen Massnahmen sollten immer Teil einer übergeordneten Strategie sein und auch mit den verkehrspolitischen Zielen abgestimmt werden, damit ein funktionales Netz über alle Verkehrsmittel entsteht und eine möglichst optimale Beeinflussung des Verkehrssystems erreicht wird.

#### 8.1.4 Überblick über die Massnahmen und Definition der Zuständigkeiten

Im Folgenden werden die Massnahmen, die in den Kapiteln 8.1.1 und 8.1.3 detailliert beschrieben wurden, nochmals tabellarisch zusammengefasst. Dazu werden die zuvor beschriebenen Handlungsempfehlungen nach Themenfeldern aggregiert und dabei die Unterteilung nach regulatorischen, baulichen und betrieblichen Massnahmen aufgehoben. Die Themenfelder werden den Strassentypen, die diese betreffen, zugeordnet und zudem entsprechende Zuständigkeiten definiert. Die Tabelle soll den verschiedenen Infrastrukturbetreibern als Orientierungshilfe zur Weiterbearbeitung der vorgeschlagenen Massnahmen dienen. Dazu werden in der folgenden Tabelle die Themenfelder markiert (grün), die mit einer besonders hohen Dringlichkeit in naher Zukunft angegangen werden sollten, um die Einführung von AF in der Schweiz möglichst funktional und sicher zu ermöglichen.

**Tab. 27** Übersicht Handlungsempfehlungen nach Strassentypen und Zuständigkeiten

Themenfelder	Beschreibung der unterschiedlichen Aspekte je Themenfeld	Strassentyp		Zuständigkeit / Lead		
		HLS	städt. Strasse	Bund	Kanton Stadt	Dritte
Zulassung/ Freigabe AF	Strassenfreigabe für AF			X		
	Kennzeichnung von AF			X		X
	Festlegung Freigabe für Nutzergruppen (bspw. Kinder)			X		X
	Festlegung Verhaltensweisen von AF (Ziel: Optimierung des Verkehrsflusses)			X		X
	Festlegung von Minimalstandards und Nachrüstung von Fz (L1 bis L3)			X		
	Verpflichtung zu regelmässigen Softwareupdates			X		
	Erstellen von HD-Karten			(X)	(X)	X
	Sicherstellung der Fahrkontrolle			X		X
	(Teil-)Sperrung der Strasse für konventionelle Fahrzeuge ab einem bestimmten AF-Anteil	X	X	X	X	
Testfelder/ Pilotanwendungen	Pilotstrecken HLS einrichten	X		X		
	Piloträume städtisches Netz einrichten		X		X	
	Testfeld(er) für Schweiz-spezifische Betriebszustände einrichten (z.B. Hochgebirgsstrassen, Zollanlagen, etc.)	X	X	X	X	
(technische) Ertüchtigung Strecke/ Knoten	Ausrüsten der Infrastruktur unter Berücksichtigung zukünftiger Anforderungen (z.B. Leittechnik, Road-Side Unit, Markierungen, Fernüberwachung etc.)	X	X	X	X	
	Festlegung der zeitlichen Reihenfolge für die Umsetzung von erforderlichen Anpassungen an der Infrastruktur	X	X	X	X	
AF-Übergabeparameter	Gestaltung der Schnittstellen erarbeiten	X	X	X	X	
	Lage der Schnittstellen HLS-HVS definieren	X		X	(X)	
	Lage der Schnittstellen im städtischen Netz definieren		X	X		
dynamische Flächenzuteilung	Anlage separater Fahrstreifen für AF prüfen und ggf. umsetzen	X		X		
	Festlegung zukünftiger Fahrstreifenbreiten	X	X	X	X	X
	Anzahl, Geometrie und räumliche Verteilung von Parkplätzen festlegen		X		X	
	Flächenzuteilung für neuartige Angebotsformen, insbesondere für nicht automatisierte Fz des LV klären (Ziel: Verhaltenshomogene Verkehrsformen bündeln).		X		X	
	Anpassungen bzw. Ergänzungen der bestehenden Normierung	X	X	X		X
Verkehrsbeeinflussung (zeitlich, räumlich, modal)	Zulässige Geschwindigkeiten für AF definieren	X	X	X		
	Verkehrslenkung durch dynamische Bepreisung	X	X	X	X	
	Lenkung von Sharing-AF und Begrenzung von Leerfahrten			X	X	X
	Integration von AF in intermodale Wegeketten				X	X
	Einrichten von Bereichen für Mobilitätsdienstleistungen				X	X
PUDO-Bereiche	Definition von Lage und Anzahl		X		X	
	Regelung der Haltevorgänge zur Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems		X		X	

## 8.2 Zusammenhänge zwischen den Wirkungen durch AF und den Massnahmenfeldern

In den Kapitel 8.1.1 bis 8.1.3 werden verschiedene Massnahmen zur Optimierung des Verkehrsablaufs im Mischverkehr vorgeschlagen, um die AF-induzierten Effekte auf die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems und die Verkehrssicherheit im Sinne der verkehrspolitischen Ziele zu beeinflussen. In der folgenden Abbildung sind die Effekte durch AF (oberes Drittel), die Auswirkungen auf den Platzbedarf (mittleres Drittel) und die erforderlichen betrieblichen sowie regulatorischen Massnahmen (unteres Drittel) schematisch zusammengefasst. Dabei sind auf der horizontalen Achse die Zeitschritte 2020 bis 2050 dargestellt und die vertikale Achse bildet den qualitativen Entwicklungstrend je Themengebiet bzw. Massnahmenfeld ab. Hierbei wird bewusst auf eine Skalierung und Beschriftung der Vertikalachse verzichtet, da der grundsätzliche Trend und die entsprechenden Zusammenhänge bzw. Wechselwirkungen zwischen den Themenfeldern im Vordergrund stehen und nicht die jeweils absoluten Mengen. Zudem werden für einen Grossteil der Themenfelder Bereiche und keine scharfen Linien dargestellt. Dies hängt zum einen mit den unterschiedlichen Effekten in Bezug auf die beiden betrachteten Szenarien (Trendszenario und Extremszenario Pro Sharing) zusammen und trägt zum anderen der Tatsache Rechnung, dass auf Grund der vielen Ungewissheiten keine exakten Entwicklungen prognostiziert werden können.

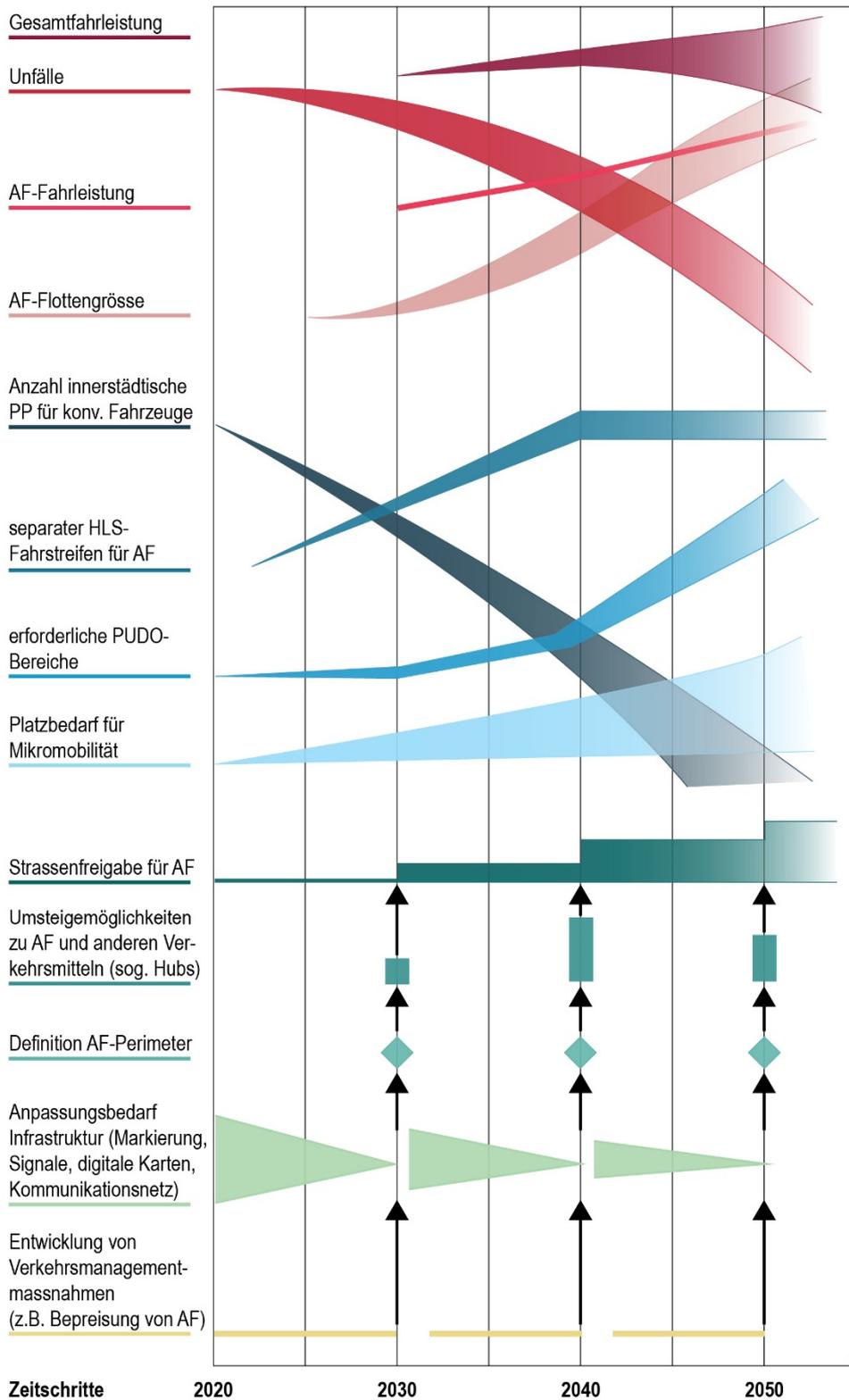
Die Abbildung zeigt im oberen Drittel in Rot die im Kapitel 4 beschriebene AF-Flottenentwicklung und die daraus mithilfe der MATSim-Simulation des TP2 abgeleitete Entwicklung der Fahrleistung (Gesamtfahrleistung und AF; Kapitel 6) sowie die erwartete Reduktion der Unfälle (Kapitel 7.3).

Im mittleren Drittel der Abbildung sind in Blau die Massnahmen im Zusammenhang mit der Veränderung der Flächennutzung durch AF aufgeführt. Diese beinhalten die Reduktion der innerstädtischen Parkplätze für konventionelle Fahrzeuge (Kapitel 7.4), die vorgeschlagene separaten Fahrstreifen für AF auf der HLS (Kapitel 8.1.2) im Mischverkehr bis 2050, der erforderliche Platzbedarf bzw. die Zunahme von PUDO-Bereichen (insbesondere für Sharing-AF) sowie den zu erwartenden Flächenbedarf für neue Angebotsformen der Mikromobilität wie z.B. Mobile-Food-Stationen oder mobile Verteil- oder Sammeleinrichtungen (vgl. TP4).

Das untere Drittel der Abbildung (in Grün/Gelb) wird durch die Darstellung der gestaffelten Strassenfreigabe für AF (Kapitel 5) eingeleitet. Diese bildet eine wichtige Grundlage für die folgenden Massnahmen bzw. Anforderungen an die Infrastruktur, da zur jeweiligen Erweiterung des AF-Netzes die neuen AF-Perimeter definiert werden und entsprechende Umsteigemöglichkeiten auf andere Verkehrsmittel (sog. Hubs) vorhanden sein müssen (Kapitel 7.4 und 8.1.2); deren Anzahl nimmt entsprechend bis 2040 zu und geht 2050 wieder zurück, da das Netz dann überwiegend für AF freigegeben ist, sodass wieder weniger Hubs erforderlich sein werden. Zudem ist die Infrastruktur, soweit erforderlich, im Hinblick auf die AF-Freigabe vorzubereiten. Dies wird durch den entsprechenden Anpassungsbedarf dargestellt und bezieht sich insbesondere auf Markierung, Signalisation, digitale Karten und ein lückenloses Kommunikationsnetz. Ähnliches gilt auch für Massnahmen im Zusammenhang mit einem optimalen Verkehrsmanagement, das eine flächendeckende Zustandserfassung des Verkehrsablaufs erfordert und eine Bepreisung von AF-Fahrten sowie eine Förderung von Sharing-AF nahelegt. Die Anforderungen an das Verkehrsmanagement sind jeweils in Abhängigkeit des freigegebenen AF-Netzes zu entwickeln, da sich die Möglichkeiten und Herausforderungen zur Verkehrsbeeinflussung mit der gestaffelten Strassenfreigabe erweitern, was in der Abbildung mit Pfeilen entsprechend verdeutlicht wird.

Ziel der Abbildung ist es, die grundsätzlichen Zusammenhänge der unterschiedlichen Trends und die entsprechenden Massnahmen zusammenfassend darzustellen. Dabei sind alle Ergebnisse immer im Zusammenhang mit den im vorliegenden Forschungsprojekt getroffenen Annahmen und den darauf aufbauenden Szenarien zu verstehen.

**Effekte / Themen**



**Abb. 79** Übersichtsschema: Entwicklung Themenfelder

### 8.3 Wirkungsanalyse - Ergebnisse des TP5

Die Wirkungsanalyse wird im Rahmen der Synthesearbeiten in der nächsten Phase des vorliegenden Forschungspakets durch das TP1 bearbeitet. Dazu sind die verschiedenen TP (TP2 bis TP6) aufgefordert, einen entsprechenden Input in Bezug auf die jeweiligen Themenschwerpunkte und die erarbeiteten Ergebnisse zu liefern. Dieser ist im folgenden Kapitel in Bezug auf Fragen des Mischverkehrs und die Auswirkungen auf Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems sowie die Entwicklung der Verkehrssicherheit in tabellarischer Form dargestellt.

In der folgenden Tabelle sind die von TP1 definierten Wirkungskriterien (erste Spalte) abgebildet. Diese unterscheiden sich im Hinblick auf ihre Wichtigkeit in Bezug auf jedes der TP. Dabei wurde ursprünglich zwischen Schwerpunktthemen in Blau (TP5: Verkehrsaufkommen/-leistung, Auslastung Verkehrsnetze, Erreichbarkeiten und wirtschaftliche Entwicklungen, Technologie/Normierung, Kosteneffizienz), optionalen Themen in Rot (TP5: Modale Verkehrsverteilung, räumliche Verkehrsverteilung, Raumstruktur und Städtebau) und Themen ohne Relevanz in Grau (TP5: Umweltemissionen und Ressourcenverbrauch, gesellschaftliche Akzeptanz und Mobilitätszugang) unterschieden. Da die Wirkungskriterien und deren Zuteilung vor Beginn der Arbeiten der einzelnen TP definiert wurden und sich die Bearbeitungsschwerpunkte der einzelnen TP im Rahmen des Projekts unterschiedlich akzentuiert haben, werden in der folgenden Zusammenstellung alle Wirkungskriterien durch TP5 behandelt.

In der mittleren Spalte der Tabelle werden die Erkenntnisse je Wirkungskriterium aus Sicht des TP5 stichpunktartig erläutert. Vertiefte Informationen zu den unterschiedlichen Aspekten können den Verweisen auf die Kapitel des Forschungsberichts des TP5 entnommen werden (vgl. 3. Spalte). Im Rahmen des TP5 wurden auch Simulationsergebnisse aus MATSim (TP2) weiterverarbeitet. Erkenntnisse für die Wirkungsanalyse, die auf MATSim-Berechnungen basieren, sind in der mittleren Spalte mit einem \* gekennzeichnet.

**Tab. 28** Übersicht Wirkungskriterien und Erkenntnisse aus TP5

Wirkungskriterium	Erkenntnisse aus Sicht Mischverkehr (TP5)	Kapitel
Verkehrsaufkommen/-leistung	Die AF-Anteile im Netz übersteigen die AF-Anteile der Flotte in beiden Szenarien und allen Zeitschritten, was eine höhere Fahrleistung der AF im Vergleich zu konventionellen PW nahelegt. *	6.1
	Im Szenario mit einem höheren Anteil geteilter AF (Szenario B) entsteht mehr AF-Fahrleistung, als wenn die AF eher privat besessen werden (Szenario A). *	6.3
	Die Gesamtfahrleistung des MIV (konventionelle FZ und AF) ist aufgrund der kleineren Fahrzeugflotte im Szenario B niedriger als im Szenario A. *	6.3
Modale Verkehrsverteilung	Neue Angebotsformen durch AF führen zu einer Verlagerung des Modal Splits und stärken teilweise den Individualverkehr. Um die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems weiterhin zu gewährleisten, sind Massnahmen zur Steuerung der Angebotsqualität der neuen Angebotsformen erforderlich.	8.1
	Die AF-Anteile an den Wegen nehmen über die Zeitschritte in beiden Szenarien deutlich zu, was die Anteile des konventionellen MIV, aber auch teilweise die Anteile des ÖV und LV reduziert. *	7.4.2
	Hohe AF-Anteile und eine noch relativ grosse Flotte an konventionellem PW (Szenario A) führen zu einer Schwächung des ÖV und des LV. *	7.4.2
Räumliche Verkehrsverteilung	Eine gestaffelte Freigabe der Strassen für AF führt zu einer entsprechenden räumlichen Verteilung der AF-Nutzung.	6.2
	Die Nutzung der Sharing-AF ist stark von der angenommenen Flottengrösse und dem freigegebenen AF-Perimeter abhängig	6.2
	Eine schnelle Flottendurchdringung mit privaten AF und insbesondere Flotten mit Sharing-AF (Szenario B) führen dazu, dass AF schon in frühen Zeitschritten vermehrt genutzt werden. *	6.2
	Private AF werden vermehrt in der Innenstadt, auf der HLS und in ländlicheren Bereichen der Agglomeration genutzt*	6.2
	Sharing-AF weisen einen hohen Anteil auf Strecken in den Gemeinden der Agglomeration und der Stadt Zürich mit Ausnahme der Innenstadt auf. *	6.2
Auslastung Verkehrsnetze	Der mittlere Auslastungsgrad zur ASP bleibt auf der HLS über die Zeitschritte quasi konstant *	6.3
	Einzelne HLS-Abschnitte weisen in beiden Szenarien und allen Zeitschritten sehr hohe Auslastungsgrade auf *	7.4.2
Umweltmissionen/Ressourcenverbrauch	Eine Reduktion des Flächenverbrauchs durch Automatisierung ist im Mischverkehr nur bedingt möglich.	8.1
Raumstruktur und Städtebau	Eine Anpassung der Markierung und eine neue Zuteilung der Verkehrsflächen auf der HLS und auf innerstädtischen Strassen könnten für funktionsfähige AF erforderlich werden.	7.4.4/ 8.1
	Das Schaffen von Flächen für neue Angebotsformen, insbesondere für neue Formen der Mikromobilität, kann durch ein Aufheben von innerstädtischen Parkfeldern im öffentlichen Strassenraum zumindest teilweise ermöglicht werden.	7.4.4/ 8.1
	Die Einrichtung von PUDO-Bereichen und Umsteigemöglichkeiten zwischen AF und ÖV insbesondere am Rand der AF-Perimeter wird in den Mischverkehrszuständen 2030 und 2040 erforderlich werden.	7.4.4/ 8.1
	Dynamische bzw. zeitlich unterschiedliche Strassenrandnutzungen und betrieblichen Verkehrsmanagementmassnahmen (z.B. Strassensperrung für einzelne Verkehrsformen) werden zur Optimierung des Verkehrsablaufs und zur Aufwertung des Strassenraums empfohlen.	7.4.4/ 8.1
Gesellschaftliche Akzeptanz und Mobilitätszugang	Zu diesem Wirkungskriterium liegen aus TP5 keine Erkenntnisse vor.	-

Wirkungskriterium	Erkenntnisse aus Sicht Mischverkehr (TP5)	Kapitel
Erreichbarkeiten und wirtschaftliche Entwicklungen	Über die Zeitschritte wird eine Zunahme der Reisezeiten auf ausgewählten Relationen insbesondere bei einer primär privaten AF-Nutzung festgestellt. *	7.4.2
	Eine Verbesserung der Zuverlässigkeit in Bezug auf die Reisezeit wird nur bei einer Reduktion der Gesamtfahrzeugflotte (Szen. B) sichtbar. *	7.4.2
Technologie/ Normierung	Die Verfügbarkeit der AF-Technologie Level 4 wird ab 2025 erwartet.	4
	Eine gestaffelte Freigabe der unterschiedlichen Strassentypen wird als wahrscheinlich beurteilt. (ab 2030 HLS und ausgewählte städtische Strassen)	5.2
	Infrastrukturelle Schnittstellen an den Grenzen der AF-Perimeter sind für den Mischverkehr zu definieren und bereitzustellen, insbesondere im Übergangsbereich HLS zum nachgelagerten Netz.	7.4.4/ 8.1
	Im Mischverkehr wird empfohlen, auch eine Kommunikationsschnittstelle zwischen AF und nicht automatisierten Verkehrsteilnehmern, insbesondere dem LV zu ermöglichen.	8.1
Kosteneffizienz (Infrastruktur, Betrieb und Unterhalt)	Durch die erwartete Reduktion der Unfälle (hohes Unfallvermeidungspotenzial durch AF insbesondere) wird erwartet, dass sich auch die Unfallfolgekosten entsprechend reduzieren.	7.3.3
	Eine Optimierung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems durch AF kann auch die Kosteneffizienz der Mobilität verbessern.	7.4
	Es wird erwartet, dass die Betriebskosten der Infrastruktur durch zusätzliche Kommunikationseinrichtungen und Verkehrsmanagement-einrichtungen steigen werden.	8.1
	Es wird ein finanzieller Initialaufwand zur Nachrüstung der Infrastruktur im Hinblick auf AF erwartet. Dieser wird wahrscheinlich erforderlich, um die einzelnen Strassentypen für AF freizugeben.	7.4/ 8.1



## 9 Weiterer Forschungsbedarf

Der vorliegende Forschungsbericht «Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 5: Mischverkehr» zum Forschungsprojekt ASTRA 2018/005 beschäftigte sich mit der grundlegenden Frage der Durchdringung von AF in der Fahrzeugflotte (zeitlich- räumlich) und den Effekten des automatisierten Fahrens auf die Infrastruktur, die Raumentwicklung sowie die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems und Sicherheit des Verkehrsablaufs.

Auch nach Abschluss dieses Forschungsprojektes bleiben noch verschiedene Aspekte im Zusammenhang mit den Fragestellungen dieses Arbeitspaketes offen, bzw. es ergeben sich aus den vorliegenden Erkenntnissen neue Fragestellungen. In etlichen Fällen musste das Betrachtungsspektrum innerhalb der Arbeiten dieses Forschungsprojektes eingeschränkt werden, häufig wurden mittels Szenarien Annahmen getroffen, welche dann genauer untersucht wurden. Die Annahmen für Prognosen der Zukunft unterliegen jedoch stets Unsicherheiten. Im Folgenden sind einige Aspekte gelistet, die in weiterführenden Forschungsarbeiten nähere Betrachtung finden sollten.

### Thema Flottendurchdringung

Innerhalb dieser Forschungsarbeit wurden nur wenige Szenarien definiert, wie sich die Schweizer Flotte in der Zukunft entwickeln wird und welchen Anteil automatisierte Fahrzeuge haben werden. Die Anzahl der Szenarien musste niedrig gehalten werden, da alle Szenarien in einer aufwändigen Simulation umgesetzt werden sollten. Aus der Treiberanalyse ging allerdings hervor, dass eine Vielzahl von Aspekten Einfluss auf die Durchdringung von AF in einer Fahrzeugflotte haben. Weitere Szenarien bzgl. der Entwicklung der Fahrzeugflotte wären also durchaus denkbar und sinnvoll. Insbesondere wären weitere Untersuchungen denkbar, bei denen eine Rückkopplung anderer Annahmen, beispielsweise über die beschränkte Nutzbarkeit von AF im Strassenraum, betrachtet werden. Die folgenden Themen wären für weitere Untersuchungen von gesteigertem Interesse:

- Effekte begrenzter räumlicher Nutzbarkeit (Zulassung) von AF-Level 5 auf die Kaufbereitschaft von Fahrzeugen und die Flottendurchdringung
- Effekte von Sperrungen einzelner Strassentypen für konventionelle Fahrzeuge (Level 1 bis Level 3) auf die Kaufbereitschaft und Flottendurchdringung
- Auswirkungen einer Etablierung neuer Flottenbetreiber auf die AF-Anteile («Anteilsprünge» der AF an der Gesamtflotte)

### Thema Betrieb von AF Flotten

Aus den oben genannten Aspekten ergeben sich ebenso Fragestellungen der sinnvollen Einsetzbarkeit von AF. Insbesondere die Szenarien, in denen AF verstärkt geteilt genutzt werden und so evtl. sogar private Fahrzeuge ersetzen können, ergeben interessante Zukunftsszenarien. Es ist jedoch fraglich, wann sich eine solche Flotte von automatisierten Fahrzeugen auch aus Betreibersicht lohnt. Insbesondere, wenn AF nur in räumlich isolierten Gebieten genutzt werden können, wären folgende Fragestellungen genauer zu untersuchen:

- Ab welcher Raumgrösse und Nachfrage ist für den Betreiber eine betriebswirtschaftlich sinnvolle Flottengrösse möglich?
- Welche Strassen weisen einen besonders hohen Anteil an AF bzw. an Sharing AF auf und was sind die Gemeinsamkeiten?
- Was sind die Rahmenbedingungen, angrenzende Nutzungen oder weitere Einflussgrössen, die eine verstärkte AF Nutzung im mikroskopischen Bereich fördern?
- Wie wird sichergestellt, dass Fahrer die Fahraufgabe nach Aufforderung an AF-Perimetergrenzen wieder sicher übernehmen?

## Thema Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems

Aus den Untersuchungen in der Simulation konnten einige Fragestellungen in Bezug auf die Funktionsfähigkeit analysiert und beantwortet werden. Etliche Aspekte bleiben jedoch offen. Insbesondere da AF in der untersuchten Form heutzutage noch nicht auf den Strassen sind, können manche Fragestellungen ohne Feldversuche nicht beantwortet werden. Aus den vielen möglichen neuen Angebotsformen, die sich zukünftig auf den Strassen bewegen werden, können sich beispielsweise neue Anforderungen an die Sicherheit oder das subjektive Sicherheitsgefühl von Verkehrsteilnehmern ergeben. Auch welche Arten von Situationen besonders kritisch werden oder sogar zu Unfällen führen könnten bleibt noch offen. In Bezug auf die Funktionsfähigkeit und Sicherheit des Verkehrssystems ergeben sich beispielsweise noch die folgenden Themengebiete, welche in zukünftigen Studien gewürdigt werden sollten:

- Untersuchung der Verkehrsdichte auf ausgewählten Streckenabschnitten und deren Einfluss auf die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems sowie die subjektive Sicherheit insbesondere des Langsamverkehrs.
- Effekte differenzierter Anteile automatisierter Verkehre auf den Stellplatzbedarf im Strassenraum sowie die Gestaltung von Parkierungseinrichtungen
- Einfluss von Fahrmanövern in PUDO-Bereichen auf den Verkehrsablauf mit automatisierten Fahrzeugen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Sharing-Anteile
- Möglichkeiten und Potenziale einer flexiblen Nutzung des Strassenraums in Abhängigkeit unterschiedlicher AF-Anteile
- Einfluss der räumlichen Anordnung (innen- oder aussenliegend) eines separaten Fahrstreifens für AF auf der Autobahn im Hinblick auf den Betriebsablauf und den Effekt auf die Sicherheit und Funktionsfähigkeit von Hochleistungsstrassen.
- Einfluss der Übergabe von Fahraufgaben vom System an den Fahrer auf die Verkehrssicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems mit besonderer Berücksichtigung von Situationen, in denen Fahrer der Aufforderung nicht nachkommen
- Möglichkeiten der Verkehrsbeeinflussung mithilfe von AF zur Optimierung des Verkehrsablaufs durch z.B. eine angepasste Routenwahl und somit das Potenzial von Verkehrsmanagementmassnahmen im Mischverkehr
- Untersuchung der Notwendigkeit zur Trennung von AF und konventionellen Fahrzeugen in bestimmten Mischverhältnissen
- Detaillierte Untersuchung der Auswirkungen des automatisierten Güterverkehrs und dessen Reorganisation aufgrund automatisierter Fahrzeuge.
- Vertiefte Untersuchung von alternativen Steuerungsprozessen durch z.B. Mobility Pricing oder ein verpflichtendes Routing zu, Optimierung des Verkehrsflusses im Netz.

Grundsätzlich ist zu empfehlen, dass z.B. beim Bundesamt für Strassen ein kontinuierlicher, engmaschiger Monitoringprozess zum Thema «Einführung des automatisierten Fahrens» eingerichtet wird. Dieser könnte von einer einschlägig erfahrenen Forschungs- und Beratungsgruppe (z.B. aus diesem Projekt abgeleitet) begleitet werden.

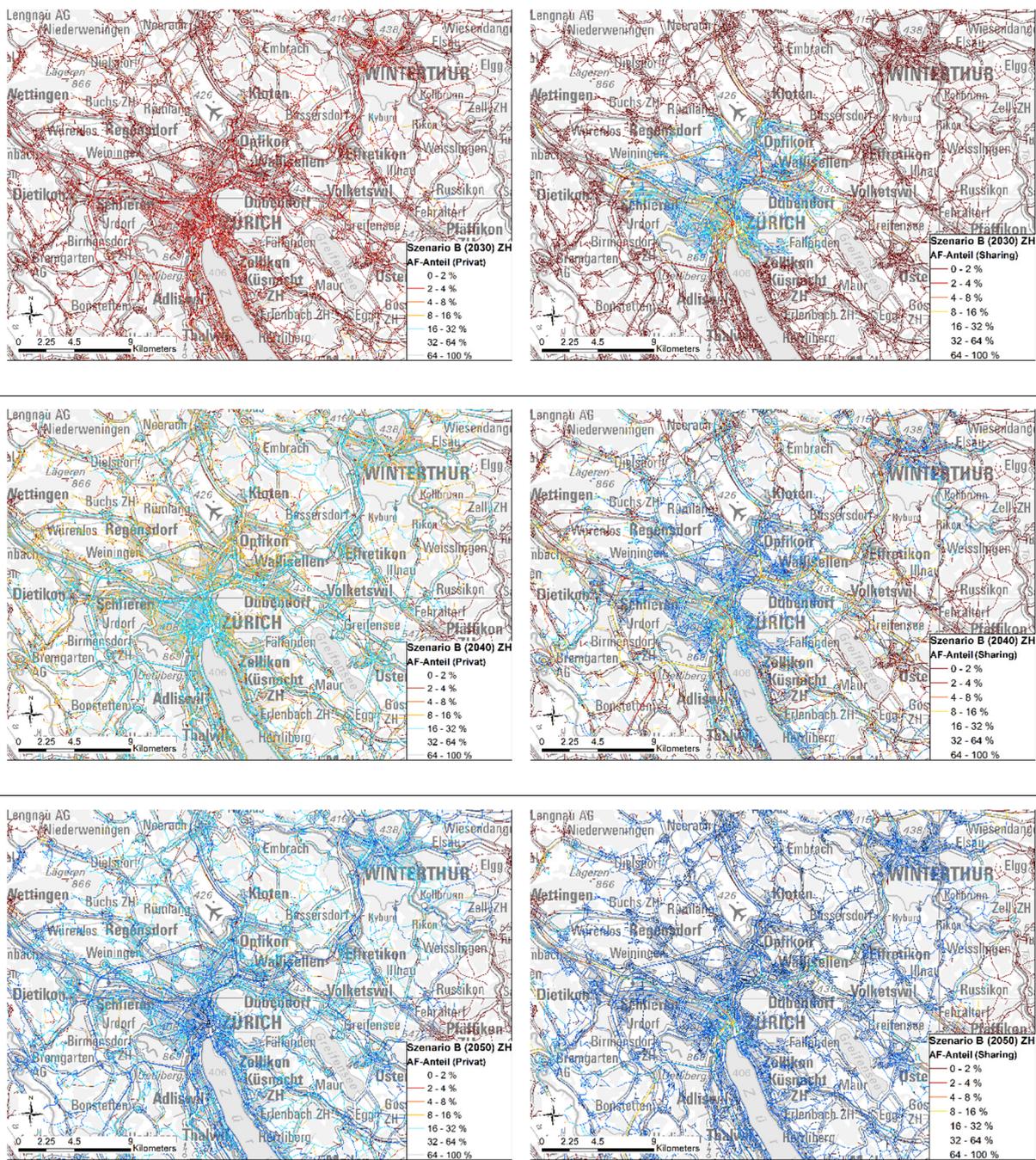
Damit soll das Ziel verfolgt werden, dass der technische Fortschritt samt praktischen Erfahrungswerten kontinuierlich und international beobachtet wird und immer wieder auf die Erkenntnisse und Empfehlungen dieser Untersuchung reflektiert werden kann. Dabei sind z.B. die Fragen «Was weiss man mehr?», «Welche Empfehlung kann geschärft oder verworfen werden?», «Was kann bzw. muss jetzt im Detail genauer untersucht werden?» etc. zu beantworten, um so möglichst optimal auf die Einführung des automatisierten Fahrens vorbereitet zu sein.

# Anhänge

<b>I</b>	<b>AF-Anteile (privat und sharing) – Szenario B.....</b>	<b>165</b>
<b>II</b>	<b>Steckbriefe Pilotstrecken Zürich .....</b>	<b>166</b>
II.1	Alfred-Escher-Strasse .....	166
II.2	Badenstrasse .....	166
II.3	General-Guisan Quai .....	167
II.4	Pfingstweidstrasse .....	167
II.5	Talstrasse .....	168
II.6	Verzweigung Limmattal .....	168
II.7	Wallisellerstrasse .....	169



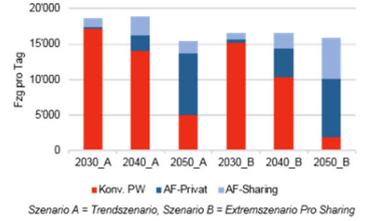
# I AF-Anteile (privat und sharing) – Szenario B



Anteil automatisierter Fahrzeuge je Nutzungsform im Teilraum Zürich im Szenario B in den Jahren 2030 bis 2050

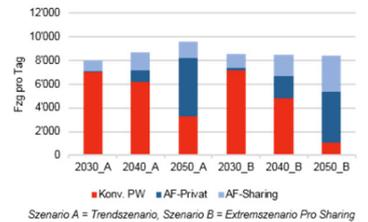
## II Steckbriefe Pilotstrecken Zürich

### II.1 Alfred-Escher-Strasse



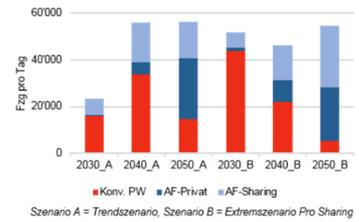
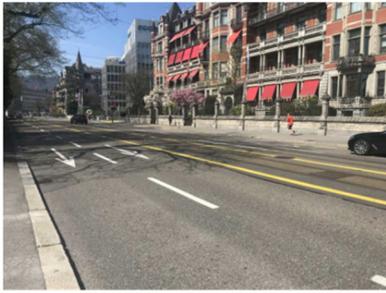
Charakteristik	Nutzungen	Verkehrsmittel <i>Belastung pro Tag</i>	Automatisierter MIV <i>Belastung pro Tag</i>
50 km/h	Wohnen	16'600 Fzg <small>MATSim 2020</small>	15'500 Fzg <small>MATSim Szenario A (2050)</small>
1 + 1 FS	Arbeiten	Eigentrasse	10'400 AF <small>MATSim Szenario A (2050)</small>
	Einkaufen	Mischbetrieb	davon 1'700 AF-Sharing <small>MATSim Szenario A (2050)</small>
	Freizeit	n.a FG	5'100 Konv. PW <small>MATSim Szenario A (2050)</small>
		n.a Velo	

### II.2 Badenstrasse

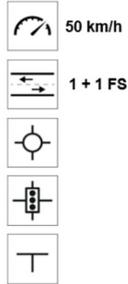


Charakteristik	Nutzungen	Verkehrsmittel <i>Belastung pro Tag</i>	Automatisierter MIV <i>Belastung pro Tag</i>
50 km/h	Wohnen	9'100 Fzg <small>MATSim 2020</small>	9'600 Fzg <small>MATSim Szenario A (2050)</small>
1 + 1 FS	Arbeiten	Eigentrasse	6'300 AF <small>MATSim Szenario A (2050)</small>
	Einkaufen	Mischbetrieb	davon 1'400 AF-Sharing <small>MATSim Szenario A (2050)</small>
	Freizeit	n.a FG	3'300 Konv. PW <small>MATSim Szenario A (2050)</small>
		3'100 Velo	

## II.3 General-Guisan Quai



### Charakteristik



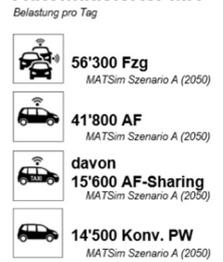
### Nutzungen



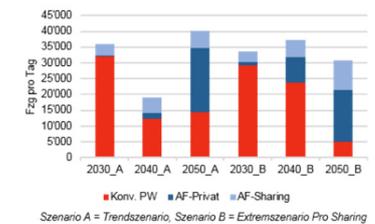
### Verkehrsmittel



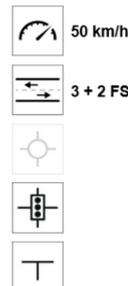
### Automatisierter MIV



## II.4 Pfingstweidstrasse



### Charakteristik



### Nutzungen



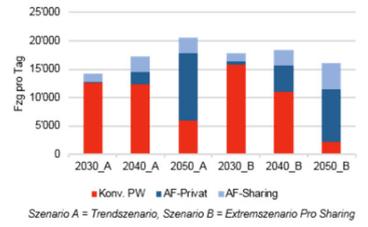
### Verkehrsmittel



### Automatisierter MIV

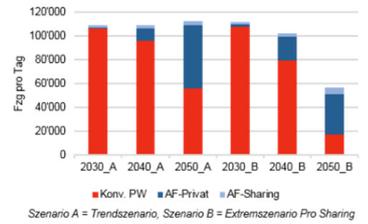
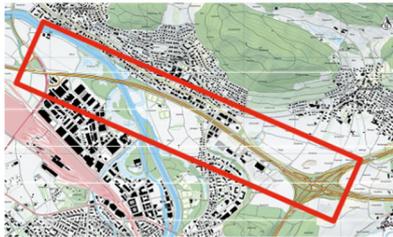


## II.5 Talstrasse



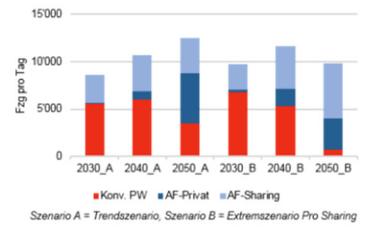
Charakteristik	Nutzungen	Verkehrsmittel	Automatisierter MIV
<ul style="list-style-type: none"> <li>50 km/h</li> <li>1 + 1 FS</li> <li>Einbahnstraße</li> <li>Einbahnstraße</li> <li>Einbahnstraße</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wohnen</li> <li>Arbeiten</li> <li>Einkaufen</li> <li>Freizeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>15'100 Fzg (MATSim 2020)</li> <li>Eigentrasse</li> <li>Mischbetrieb</li> <li>n.a FG</li> <li>n.a Velo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>20'500 Fzg (MATSim Szenario A (2050))</li> <li>14'500 AF (MATSim Szenario A (2050))</li> <li>davon 2'700 AF-Sharing (MATSim Szenario A (2050))</li> <li>6'000 Konv. PW (MATSim Szenario A (2050))</li> </ul>

## II.6 Verzweigung Limmattal



Charakteristik	Nutzungen	Verkehrsmittel	Automatisierter MIV
<ul style="list-style-type: none"> <li>100 / 80 km/h</li> <li>3 + 3 FS</li> <li>4 + 4 FS</li> <li>Einbahnstraße</li> <li>Einbahnstraße</li> <li>Einbahnstraße</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wohnen</li> <li>Arbeiten</li> <li>Einkaufen</li> <li>Freizeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>130'900 Fzg (MATSim 2020)</li> <li>Mischbetrieb</li> <li>Mischbetrieb</li> <li>n.a FG</li> <li>n.a Velo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>112'600 Fzg (MATSim Szenario A (2050))</li> <li>56'700 AF (MATSim Szenario A (2050))</li> <li>davon 3'200 AF-Sharing (MATSim Szenario A (2050))</li> <li>55'900 Konv. PW (MATSim Szenario A (2050))</li> </ul>

## II.7 Wallisellerstrasse



### Charakteristik

- 50 km/h
- 1 + 1 FS
- 
- 

### Nutzungen

- Wohnen
- Arbeiten
- Einkaufen
- Freizeit

### Verkehrsmittel

- Belastung pro Tag
- 7'300 Fzg  
MATSim 2020
  - Eigentrasse
  - Mischbetrieb
  - n.a FG
  - n.a Velo

### Automatisierter MIV

- Belastung pro Tag
- 12'500 Fzg  
MATSim Szenario A (2050)
  - 9'000 AF  
MATSim Szenario A (2050)
  - davon 3'700 AF-Sharing  
MATSim Szenario A (2050)
  - 3'500 Konv. PW  
MATSim Szenario A (2050)



## Glossar

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
AF	Automatisierte Fahrzeuge
ARE	Bundesamt für Raumentwicklung
AS	Anschlussstelle
ASP	Abendspitzenstunde
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BFS	Bundesamt für Statistik
CH	Schweiz
DTV	durchschnittlicher Tagesverkehr
DWV	durchschnittlicher Werktagsverkehr
ES	Erschliessungsstrasse
FS	Fahstreifen
Fz	Fahrzeuge
GIS	Geografisches Informationssystem
GV	Güterverkehr
HLS	Hochleistungsstrasse
HVS	Hauptverkehrsstrasse
Level 4	Automatisierte Fahrzeuge mit SAE Level 4
Level 5	Automatisierte Fahrzeuge mit SAE Level 5
LSA	Lichtsignalanlage
LV	Langsamverkehr (Velo- und Fussverkehr)
MATSim	Multi-Agent Transport Simulation Toolkit
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MSP	Morgenspitzenstunde
NPVM	Nationales Personenverkehrsmodell
NS	Nationalstrasse
PL	Projektleitung
POL	Projektoberleitung
PUDO	Pick-up-/Drop-off-Bereiche
PUN	Pannestreifenumnutzung
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PCU	Passenger Car Unit
PP	Parkplätze
PW	Personenwagen
PWE	Personenwagen-Einheiten
SAE	Society of Automotive Engineers
Sharing	geteilte Nutzung von Pw
SS	Sammelstrasse
SVI	Vereinigung Schweizerischer Ingenieure
TP	Teilprojekte im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts
VM	Verkehrsmanagement
VS	Verbindungsstrasse
VQS	Verkehrsqualitätsstufe



## Literaturverzeichnis

Abraham, H. et al., 2016. *Autonomous Vehicles, Trust, and Driving Alternatives: A survey of consumer preferences*. s.l.:White Paper.

Ackermann, T., Friedrich, M. & Hartl, M., 2017. Autonome Fahrzeug-Flotten verändern den städtischen Verkehr. *Der Nahverkehr*, pp. 1-13.

Altenburg, S., Kienzler, H.-P. & Auf der Maur, A., 2018. *Einführung von Automatisierungsfunktionen in der Pkw-Flotte*, Berlin: s.n.

ARE, 2016. *Perspektiven des Schweizerischen Personen- und Güterverkehrs bis 2040*, Bern: Bundesamt für Raumentwicklung.

ARE, 2017. *Zukunft Mobilität Schweiz UVEK-Orientierungsrahmen 2040*, Bern: Bundesamt für Raumentwicklung.

ASTRA, 2013. *Pannestreifenumnutzung*, Bern: Bundesamt für Strassen.

Auto Schweiz, 2016. *Jahresbericht 2015/16*, Innerberg: s.n.

Automobilwoche, 2015. Kosten des autonomen Fahrens: Preis der Technik wird sinken. *Automobilwoche*, Juli.

Axhausen, K., Ciari, F., Hörl, S. & Becker, F., 2018. *Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge*, s.l.: s.n.

BAK Economics AG, 2018. *Konjunkturausblick für das Schweizer Autogewerbe*, Basel: s.n.

Barthelmes, S. et al., 2017. *Autonomes Fahren Erwartungen an die Mobilität der Zukunft*, s.l.: s.n.

Beiker, S. A., 2015. Einführungsszenarien für höhergradig automatisierte Straßenfahrzeuge. In: *Autonomes Fahren*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 197-217.

BFS, 2017. *Szenarien zur Entwicklung der Haushalte 2017-2045*, Neuchâtel: Bundesamt für Statistik .

BFS, 2019. *Medienmitteilung: Erneut weniger Inverkehrsetzungen im Jahr 2018*, Neuchâtel: Bundesamt für Statistik.

BFS, 2019. *Strassenfahrzeuge – Bestand, Motorisierungsgrad*. [Online] Available at: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/fahrzeuge/strassenfahrzeuge-bestand-motorisierungsgrad.html>

Bierstedt, J. et al., 2014. *Effects of Next-Generation Vehicles on Travel Demand and Highway Capacity*, s.l.: FP Think Working Group.

Bösch, P., Becker, F., Becker, H. & Axhausen, K., 2018. Cost-based analysis of autonomous mobility services. *Transport Policy* 64, pp. 76-91.

Bratzel, S. & Tellermann, R., 2018. *Finanzierung und Absicherung neuer Mobilitätskonzepte*, s.l.: Center of automotive management.

Dominković, D. F., Bačeković, I., Pedersen, A. S. & Krajačić, G., 2018. The future of transportation in sustainable energy systems: Opportunities and barriers in a clean energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, pp. 1823-1833.

Dudenhöffer, F., 2016. *Wer kriegt die Kurve*. s.l.:Campus.

EBP Schweiz AG und Rapp Trans AG, 2018. *Verkehr der Zukunft 2060: Technologischer Wandel und seine Folgen für Mobilität und Verkehr*, s.l.: Bundesamt für Strassen.

EBP Schweiz AG, 2017. *Automatisierte und vollautonome Fahrzeuge: Akzeptanz verschiedener Anwendungen in der Bevölkerung*, s.l.: Schlussbericht.

EBP Schweiz AG, 2017. *Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag – Denkbare Anwendungen und Effekte in der Schweiz*, Zürich: s.n.

ETH Zürich / EBP Schweiz AG, 2019. *Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 2: Verkehrliche Auswirkungen und Infrastrukturbedarf*, Bern: Bundesamt für Strassen (ASTRA).

Fraedrich, E. et al., 2017. *Automatisiertes Fahren im Personen- und Güterverkehr. Auswirkungen auf den Modal-Split, das Verkehrssystem und die Siedlungsstrukturen*, s.l.: e-mobil BW GmbH.

Fridstrøm, L., Østli, V. & Johansen, K. W., 2016. *A stock-flow cohort model of the national car fleet*, s.l.: European Transport Research Review vol. 8 (3).

Friedrich, B., 2015. Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge. In: *Autonomes Fahren*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 331-350.

Gasser, T. M., 2015. Grundlegende und spezielle Rechtsfragen für autonome Fahrzeuge. In: *Autonomes Fahren*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 543-574.

Gasser, T. et al., 2015. *Bericht zum Forschungsbedarf Runder Tisch Automatisiertes Fahren – AG Forschung*, s.l.: s.n.

Gomez, P. & Probst, G., 1987. *Vernetztes Denken*. Bern: s.n.

Haberfellner, et al., 2002. *System Engineering Methodik und Praxis*. s.l.:Industrielle Organisation Zürich.

Habitat III, 2016. *New Urban Agenda*, Quito: United Nations Conference on Housing an Sustainable Urban Development.

Hedlund, J., 2017. *Autonomous Vehicles Meet Human Drivers: Traffic Safety Issues for States*. Washington DC.: s.n.

Heinrichs, D., 2015. Autonomes Fahren und Stadtstruktur. In: *Autonomes Fahren*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 219-240.

Higgins, 2018. How driveless cars are going to change cities. *The Wall Street Journal*.

Hörl, S., Becker, F., Dubernet, T. & Axhausen, K. W., 2019. *Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge*, s.l.: s.n.

Institut für Mobilitätsforschung, 2015. *Die Zukunft der Mobilität*, München: s.n.

Kanton Zürich, 2018. *Gesamtverkehrskonzept Kanton Zürich 2018*, Zürich: Regierungsrat des Kantons Zürich.

KIM Netherlands Institute for Transport Policy Analysis, 2017. *Paths to a self-driving future*, s.l.: s.n.

Kimber, R., McDonald, M. & Hounsell, N., 1984. *Passenger Car Units in Saturation Flows: Concept, Definition, Derivation*, s.l.: s.n.

Kockelman, K., 2017. *An assessment of autonomous vehicles: Traffic impacts and infrastructure needs*, s.l.: s.n.

Krause, S. et al., 2017. *Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstrasseninfrastruktur*, s.l.: VDA Verband der Automobilindustrie.

Kühn, W., 2018. Hochautomatisiertes Fahren und Strassenverkehrsinfrastruktur. *Strassenverkehrstechnik*, pp. 623-630.

Lenz, B. & Fraedrich, E., 2015. Neue Mobilitätskonzepte und autonomes Fahren: Potenziale der Veränderung. In: *Autonomes Fahren*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 175-196.

Litman, T., 2018. *Autonomous Vehicle Implementation Predictions. Implications for Transport Planning*. s.l.:s.n.

Litman, T., 2018. *Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning*, s.l.: Victoria Transport Policy Institute.

McKinsey&Company, 2016. *Automotive revolution – perspective towards 2030*, s.l.: s.n.

Meyer, J. B. P., Becker, H. & Axhausen, K., 2016. *Erreichbarkeitsauswirkungen autonomer Fahrzeuge*, Zürich: Institut für Verkehrs- und Raumplanung (IVT).

National Association of City Transportation Officials, 2017. *Blueprint for autonomous Urbanism*, New York: s.n.

NBC, 2017. *NBC News*. [Online]  
Available at: <https://www.nbcnews.com/mach/science/watch-intelligent-crosswalk-light-protect-pedestrians-ncna811996>  
[Zugriff am 13.09.2019].

Oehry, B. et al., 2019. *ASTRA 2017/007: Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 1 Nutzungsszenarien und Auswirkungen*, s.l.: ASTRA - Bundesamt für Strassen.

Oliver Wyman, 2015. *The True Value of Autonomous Driving*, s.l.: Automotive Manager.

Rapp Trans AG, 2017. *Automatisiertes Fahren; Initialprojekt: Klärung des Forschungs- und Handlungsbedarfs*, s.l.: Bundesamt für Strassen.

Rapp Trans AG, 2019. *Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 4: Neue Angebotsformen*, Bern: Bundesamt für Strassen (ASTRA).

Roland Müller Küsnacht AG, 2019. *Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 3: Umgang mit Daten*, Bern: Bundesamt für Strassen (ASTRA).

SAE International, 2018. *J3016*. s.l.:s.n.

Schmitt, K.-U. et al., 2019. *Neue Fortbewegungsmittel im Langsamverkehr: Potenziale, Sicherheit und rechtliche Aspekte*, s.l.: Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure (SVI).

Schweizerische Eidgenossenschaft, 2016. *Automatisiertes Fahren - Folgen und verkehrspolitische Auswirkungen*, s.l.: s.n.

Sommer, C., 2011. Junge Generation nutzt ÖPNV. *Hessische Niedersächsische Allgemeine*.

Trent, V. et al., 2017. When autonomous vehicles are introduced on a larger scale in the road transport system: The Drive Me Project. In: *Automated Driving. Safer and More Efficient Future Driving*. s.l.:Springer International Publishing.

Uhr, A., 2016. *Automatisiertes Fahren - Herausforderungen für die Verkehrssicherheit. Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu)*.

vbw Die bayerische Wirtschaft, 2016. *Automatisiertes Fahren – Infrastruktur*, München: s.n.

VDV Die Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), 2015. *Zukunftsszenarien autonomer Fahrzeuge Chancen und Risiken für Verkehrsunternehmen*, Köln: s.n.

Verband der TÜV e. V., 2018. *Mobility Studie 2018*, Berlin: s.n.

Vogelpohl, T. et al., 2018. Transitioning to manual driving requires additional time after automation deactivation. *Transport Research Part F*.

von Mörner, M. & Boltze, M., 2018. Sammelverkehr mit autonomen Fahrzeugen im ländlichen Raum. *Der Nahverkehr*, pp. 6-13.

VSS, 1991. *VSS-40080B - Projektierung, Grundlagen*, Zürich: Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.

VSS, 1994. *VSS-40040B - Projektierung, Grundlagen*, Zürich: Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.

Wachenfeld, W. et al., 2015. Use-Cases des autonomen Fahrens. In: *Autonomes Fahren*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 9-40.

Winkle, T., 2015. Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge: Erkenntnisse aus der Unfallforschung. In: *Autonomes Fahren*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 351-376.

Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften, 2019. *Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 6: Räumliche Auswirkungen*, Bern: Bundesamt für Strassen (ASTRA).

# Projektabschluss

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 29.11.2019

## Grunddaten

Projekt-Nr.: ASTRA 2018/005

Projekttitel: Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 5: Mischverkehr

Enddatum: 31.08.2020

## Texte

### Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Innerhalb des Verkehrswesens stellt das automatisierte Fahren – getrieben durch die Fahrzeug- und IT-Industrie – eines der zentralen Zukunftsthemen dar. Die Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen (AF) auf die Mobilität und den Raum stellen insbesondere auch die öffentliche Hand vor entsprechend grosse Herausforderungen. Das Teilprojekt 5 befasst sich mit der Frage der zeitlichen und räumlichen Durchdringung automatisierter Fahrzeuge (Level 4 und 5) und dem Einfluss eines Mischbetriebs auf die Sicherheit und die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems.

Zu Beginn der Untersuchungen des TP5 wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, welche die Grundlage zu den im weiteren Verlauf getroffenen Annahmen und durchgeführten Untersuchungen bildet. Die Analyse verschiedener Quellen ergab im Hinblick auf die Durchdringung von AF in der Fahrzeugflotte sehr unterschiedliche Einschätzungen und insbesondere für den Zeitschritt 2050 eine sehr grosse Spannweite der Ergebnisse. In einem nächsten Schritt wurde eine Treiberanalyse durchgeführt, welche es erlaubt, auf Basis der Erkenntnisse aus der Literaturrecherche und eigener Einschätzungen die identifizierbaren Treiber in Primär- und Sekundärtreiber einzuteilen. Die Primärtreiber haben einen relevanten Einfluss auf die Durchdringung der AF in der Fahrzeugflotte und deren Verfügbarkeit. Die Sekundärtreiber bilden die Rahmenbedingungen für die Marktdiffusion von AF.

Auf Basis von Annahmen zur Ausprägung verschiedener Treiber wurden Migrationsszenarien verfasst, welche – unter der Annahme, dass ab 2025 die ersten automatisierten Fahrzeuge (Level 4) verfügbar sein werden – für die Zeitschritte (2030, 2040 und 2050) mittels eines Kohortenmodells modelliert wurden. Mithilfe dieses eigens entwickelten Flottenmodells wurden anhand verschiedener Szenarien die Anteile der unterschiedlichen Angebotsformen der AF in der Schweizer Fahrzeugflotte und deren Entwicklung über die Zeit abgeschätzt und quantifiziert. Dabei wurde sowohl ein Trend-, als auch ein Pro Sharing-Szenario mit jeweils korrespondierenden Extremszenarien ausgearbeitet. Um die zeitlich-räumliche Durchdringung von automatisierten Fahrzeugen zu bewerten, ist neben dem Flottenmodell die Freigabe der Strassen für AF von zentraler Bedeutung. Dafür wurden massgebende Faktoren ermittelt und die zeitliche Abfolge der vollumfänglichen Nutzbarkeit unterschiedlicher Strassentypen durch AF-Level 4 prognostiziert. Dabei wird mit einer Freigabe der Hochleistungsstrassen (HLS) im Jahr 2030 (inkl. ausgewählter innerstädtischer Gebiete), aller städtischen Strassen im Jahr 2040 und der verbleibenden Strassen (Hauptverkehrsstrassen (HVS) ausserorts) im Jahr 2050 gerechnet. Diese Etappierung und Reihenfolge der Strassenfreigabe stützt sich auf Forschungsergebnisse Dritter als auch auf eigene Einschätzungen unter Berücksichtigung der massgebenden Einflussfaktoren.

Die Analyse der im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts durch das TP2 erarbeiteten MATSim-Ergebnisse der durch TP5 vorgeschlagenen Szenarien (Trendszenario und Extremszenario Pro Sharing) zeigt, dass die AF-Anteile im Netz höher sind, als die in der Flotte, was eine vermehrte Nutzung der AF nahelegt und sich auch in der teilweise festgestellten Zunahme der Gesamtfahrleistung im Netz widerspiegelt. In Bezug auf die Auswirkungen auf die Sicherheit zeigt sich, dass basierend auf einer Auswertung der Unfälle auf Schweizer Strassen zwischen 2010 bis 2017 ein überwiegender Teil (96 %) der heutigen Unfälle durch Automatisierung der Fahraufgabe adressiert werden kann. Die restlichen 4 % sind teilweise oder nicht adressierbar. In Anbetracht, dass auch AF-induzierte neue Unfälle hinzukommen können, stellt die Reduktion der Unfälle mit 96 % ein als maximal zu bezeichnendes Vermeidungspotenzial dar. Dabei wurden die Reduktionen ebenfalls wieder nach Strassentyp, Zeitpunkt und nach den beiden Szenarien unterschieden. Als besondere Herausforderung mit noch nicht abschätzbarem, aber sicher sehr hohem Forschungs- und Entwicklungsaufwand sowie einem massgebenden Einfluss auf die Verkehrssicherheit zeichnet sich bereits heute die Abstimmung zwischen Mensch (als z.B. Fahrer, Fussgänger) und Maschine (dem intelligenten Roboterfahrzeug) ab. Die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems wurde auf Basis einzelner Indikatoren untersucht und soweit möglich und sinnvoll quantifiziert. Daraus wurden auf Grundlage von drei unterschiedlichen Pilotstrassen (HLS im Raum Urdorf-Nord sowie zwei innerstädtischen Strassen in Zürich) die zukünftigen regulatorischen, betrieblichen und infrastrukturellen Anforderungen abgeleitet. Dabei zeigt sich insbesondere die Problematik des hier im Fokus stehenden Mischverkehrs aus automatisierten und konventionellen Fahrzeugen. Solange dieser vorhanden ist, kann das AF-induzierte Potenzial (bspw. Reduktion der Fahrstreifenbreite) nur sehr bedingt ausgeschöpft werden.

Aus den drei Themenfeldern der regulatorischen, baulichen und betrieblichen Massnahmen wurden Handlungsempfehlungen abgeleitet den einzelnen Strassentypen und Akteuren zugeordnet sowie priorisiert. Die wichtigsten Aspekte sind die Festlegung der Strassenfreigabe und Nutzergruppen für AF, das Erstellen von HD-Karten für die freigegebenen Strassen, die Festlegung der zeitlichen Reihenfolge für die Umsetzung von erforderlichen Anpassungen an der Infrastruktur, die Definition der Lage und die Gestaltung der Übergabebereiche (Mensch-Maschine) für AF Level 4 sowie die Anpassung der bestehenden Normierung im Hinblick auf verfügbare Strassenbreiten und der Flächenzuteilung für neue Angebotsformen (Fahren und Halten).



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Der vorliegende Forschungsbericht «Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 5: Mischverkehr» zum Forschungsprojekt ASTRA 2018/005 beschäftigt sich mit der grundlegenden Frage der Durchdringung von AF in der Fahrzeugflotte (zeitlich/räumlich) und den Effekten des automatisierten Fahrens auf die Infrastruktur, die Raumentwicklung sowie die Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems und Sicherheit des Verkehrsablaufs. In allen Bereichen konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit neue Erkenntnisse erarbeitet und insbesondere zu vertiefende Themenfelder identifiziert werden, was den Zielen dieser Grundlagenarbeit entspricht.

Folgerungen und Empfehlungen:

Auch nach Abschluss dieses Forschungsprojektes bleiben noch verschiedene Aspekte im Zusammenhang mit den Fragestellungen dieses Arbeitspaketes offen bzw. ergeben sich aus den vorliegenden Erkenntnissen neue Fragestellungen, die es im Rahmen von weiteren Forschungspaketen zu bearbeiten und zu beantworten gilt. In diesem Zusammenhang wird insbesondere empfohlen, dass z.B. beim Bundesamt für Strassen ein kontinuierlicher, engmaschiger Monitoringprozess zum Thema «Einführung des automatisierten Fahrens» eingerichtet wird. Damit soll das Ziel verfolgt werden, dass der technische Fortschritt samt praktischen Erfahrungswerten kontinuierlich beobachtet wird und immer wieder auf die Erkenntnisse und Empfehlungen dieser Untersuchung reflektiert werden kann, um die erarbeiteten Massnahmen und Handlungsempfehlungen ggf. vertieft auszuarbeiten oder anzupassen, um so auf die Einführung des automatisierten Fahrens möglichst optimal vorbereitet zu sein.

Publikationen:

Vor der Publikation der gesamten Forschungsergebnisse wurden auszugswise einzelne Aspekte in folgenden Publikationen verwendet:

Estimation of Passenger Car Equivalents for New Forms of Mobility, Investigating the effect of automated vehicles on the saturation flow of urban intersections, Krause, Fehn, Armbruster, Richner, Busch, hEART September 2019

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Prof. Dr.-Ing. Busch

Vorname: Fritz

Amt, Firma, Institut: Technische Universität München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Ziele des Teilprojektes Mischverkehr waren, die zeitliche und räumliche Durchdringung automatisierter Fahrzeuge (SAE Level 4 und 5) und den Einfluss eines Mischbetriebs auf die Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems für einen Zeitraum bis 2050 begründet abzuschätzen. Darauf aufbauend waren Handlungsempfehlungen für die Infrastrukturbetreiber zu geben. Diese Ziele wurden vollumfänglich erreicht. Mit dem Bericht wurde ein Grundlagendokument für eine weitere faktenbasierte Auseinandersetzung mit dem Mischbetrieb auf der Strasse vorgelegt, der über die Schweiz hinaus Bedeutung haben dürfte.

Umsetzung:

Mit einem Flottenmodell, das verschiedene Treiber berücksichtigt, wurden Migrationsszenarien erarbeitet. Die verschiedenen Anteile der unterschiedlichen Angebotsformen automatisierten Fahrens in der schweizerischen Fahrzeugflotte und deren Entwicklung über die Zeit wurden abgeschätzt und quantifiziert. Zudem wurden Annahmen zur Freigabe unterschiedlicher Strassentypen für SAE Level 4-Fahrzeuge getroffen. Mittels dem Simulationsprogramm MATSim wurde dann auf dieser Basis durch das Teilprojekt 2 eine Verkehrssimulation durchgeführt, um die Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf das zukünftige Verkehrsverhalten und die Verkehrsbelastung im Strassennetz zu prognostizieren. Das Unfallvermeidungspotential sowie die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit des Verkehrssystems wurde auf Basis einzelner Indikatoren untersucht und soweit möglich und sinnvoll quantifiziert. Darauf wurden auf der Grundlage von drei unterschiedlichen Pilotstrassen (ländlich, städtisch) die zukünftigen regulatorischen, betrieblichen und infrastrukturellen Anforderungen abgeleitet.

weitergehender Forschungsbedarf:

Es fehlen insbesondere noch Feldversuche zu verschiedenen neuen Angebotsformen, z.B. Bestimmung sicherheitskritischer Situationen, Sicherstellung einer sicheren Übernahme der Fahraufgabe durch einen Fahrer an der Perimetergrenze.

Einfluss auf Normenwerk:

keiner

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Wieland

Vorname: Erwin

Amt, Firma, Institut: Bundesamt für Strassen ASTRA

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

*Wieland*

## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch) (*Forschung im Strassenwesen* → *Downloads* → *Formulare*) heruntergeladen werden.