

Universität Stuttgart

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

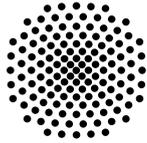
Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Friedrich

Abbildung der Eigenschaften automatisierter Fahrzeuge in makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen

Jörg Sonnleitner

Veröffentlichungen aus dem
Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Heft 61 (April 2022)



Universität Stuttgart

Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik
Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Friedrich

Abbildung der Eigenschaften automatisierter Fahrzeuge in makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen

Jörg Sonnleitner

Veröffentlichungen aus dem
Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Heft 61 (April 2022)

Herausgeber : Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Universität Stuttgart

Copyright : Das Copyright liegt beim Verfasser.

Eigenverlag und Vertrieb : Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Universität Stuttgart

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und
Verkehrsleittechnik
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

Hinweis / Note:

Diese Veröffentlichung ist auch als "Elektronische Dissertation" online unter <http://elib.uni-stuttgart.de> verfügbar und kann dort im PDF-Format heruntergeladen werden.

This paper is also published online as "Electronic Dissertation" at <http://elib.uni-stuttgart.de> and can be downloaded there as PDF file.

Abbildung der Eigenschaften automatisierter Fahrzeuge in makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Jörg Sonnleitner

aus Göppingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Tobias Kuhnimhof

Tag der mündlichen Prüfung: 29.04.2022

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

Universität Stuttgart

2022

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik des Institutes für Straßen- und Verkehrswesen an der Universität Stuttgart.

Als Erstes danke ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich. Er war entscheidend dafür, dass ich als Kybernetiker die unübliche Vertiefungsrichtung Verkehr gewählt habe. Während der Tätigkeit am Lehrstuhl hat er wesentlich zu meiner Entwicklung beigetragen und mich stets motiviert und unterstützt. Ich hoffe, mir etwas von seiner vorbildlichen Art, komplizierte Dinge einfach zu erklären und darzustellen, abgeschaut und angeeignet zu haben.

Bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tobias Kuhnimhof möchte ich mich herzlich für die Übernahme der Rolle des Mitberichters bedanken.

Vielen Dank auch an alle meine Kolleginnen und Kollegen. Ich habe mich am Lehrstuhl immer wohlgefühlt und bin gerne hergekommen.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Alice Lorenz und Yannik Wohnsdorf für ihren wertvollen Blick auf die Arbeit, bei Kea Seelhorst für die erfrischende Anwesenheit im Büro, bei Matthias Schmaus, der auch der ein oder anderen Frage ausgesetzt war, bei Emely Richter, die von Beginn an in ähnliche Themen verwickelt war und einen wertvollen Beitrag zu gemeinsamen Veröffentlichungen geleistet hat und bei Manfred Wacker für die administrative Begleitung meiner Zeit am Lehrstuhl und der Verfügbarkeit für organisatorische Fragen jeder Art.

Zuletzt danke ich meiner Familie und Anne, die mich während der ganzen Zeit unterstützend begleitet haben.

Jörg Sonnleitner

Dieser Dissertation liegen Teile des Forschungsprojektes „CoEXist – ‘AV-Ready’ transport models and road infrastructure for the coexistence of automated and conventional vehicles“ zugrunde. Das Projekt wurde im Rahmen des EU-Forschungsprogramms Horizon 2020 unter der Grant Agreement Nr. 723201 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	8
Abbildungsverzeichnis	10
Kurzfassung	13
Abstract	15
1 Einleitung	17
1.1 Hintergrund und Problemstellung	17
1.2 Motivation und Zielsetzung	18
1.3 Aufbau der Arbeit	19
2 Grundlagen	21
2.1 Verkehrsstärke, Kapazität und Leistungsfähigkeit	21
2.1.1 Definition	21
2.1.2 Konzept der Pkw-Einheiten	22
2.1.3 Ermittlung der Kapazität	24
2.1.4 Das Verkehrsflussmodell nach van Aerde	27
2.2 Fahrzeitermittlungsverfahren	29
2.2.1 Überblick	30
2.2.2 Kapazitätsbeschränkungsfunktionen	32
2.3 Verkehrsplanungsmodelle	35
2.3.1 Verkehrsangebotsmodellierung	36
2.3.2 Verkehrsnachfragemodellierung	39
2.3.3 Verkehrsumlegung für den Individualverkehr	47
2.4 Zeitwert und Zeitwahrnehmung	53
2.5 Induzierter Verkehr	55
2.6 Zwischenfazit	57

3	Automatisiertes Fahren	59
3.1	Stufen der Automatisierung	59
3.2	Verfügbarkeit und Marktdurchdringung automatisierter Fahrzeuge	61
3.3	Potenzielle Wirkungen automatisierter Fahrzeuge	66
3.3.1	Verkehrsfluss und Kapazität	67
3.3.2	Verkehrssicherheit	72
3.3.3	Zeitwahrnehmung	74
3.3.4	Angebotsqualität und Erreichbarkeit	76
3.3.5	Mobilitätsverhalten und Nachfrage	78
3.3.6	Energieverbrauch und Emissionen	82
3.3.7	Straßenraum und Verkehrsflächen	82
3.3.8	Siedlungsentwicklung	83
3.4	Zwischenfazit	84
4	Modellierung automatisierter Fahrzeuge in makroskopischen Nachfragemodellen	87
4.1	Überblick und Abgrenzung	87
4.1.1	Automatisierte Fahrzeuge im Privatbesitz	87
4.1.2	Mobilitätsdienstleistungen mit vollautomatisierten Fahrzeugen	90
4.2	Modellierungsmethoden zur Leistungsfähigkeit	91
4.2.1	Kapazität und Nachfrage in Pkw-Einheiten	92
4.2.2	Kapazität und Nachfrage in Fahrzeug- oder Zeiteinheiten	96
4.3	Modellierungsmethode zur Zeitwahrnehmung	100
4.4	Zwischenfazit	108
5	Aufbau der Szenarien und Modellanwendung	109
5.1	Verkehrsnachfragemodell des Verbands Region Stuttgart	109
5.2	Grundlegende Annahmen	111
5.3	Varianten von AV-ready Netzen	112
5.4	Leistungsfähigkeit	115
5.4.1	Annahmen	115
5.4.2	Datengrundlage	116
5.4.3	Pkw-Einheiten-Faktoren	121

5.4.4	Umsetzung	124
5.5	Zeitwahrnehmung	125
5.5.1	Annahmen	125
5.5.2	Umsetzung	128
5.6	Umlegungsverfahren	131
5.7	Übersicht zu Szenarien	134
5.8	Zwischenfazit	137
6	Ergebnisse und Interpretation	139
6.1	Kenngrößen	139
6.2	Prognose-Nullfall	140
6.3	Szenariengruppen „Introductory, Established, Prevalent“	142
6.3.1	Szenarienreihen „normal“	144
6.3.2	Szenarienreihen „red-15“	150
6.3.3	Szenarienreihen „red-30“	156
6.3.4	Prevalent-Extreme	162
6.4	Szenariengruppe „Original“	166
6.4.1	Szenarienreihen „red-15“ und „red-30“	167
6.4.2	Vergleich mit „Original-t5“ und „Original-t0“	171
6.5	Beurteilung und Diskussion der Ergebnisse	173
6.6	Zwischenfazit	176
7	Fazit	181
8	Literatur	187
9	Abkürzungsverzeichnis	197
10	Notationen	199
Anhang		203
A1	Ausprägungen zentraler Annahmen	203
A2	Berechnungsmethodik zum Rebound-Effekt	204
A3	Ergebnisse zu allen untersuchten Szenarien	206

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Definition der Automatisierungsstufen nach Norm J3016 (J3016:2021).	60
Tabelle 2:	Phasen der Koexistenz und zugehörige AV-Klassen und -Anteile.	112
Tabelle 3:	Straßenklassen, zugehörige Straßenkategorien und Bezug zu VFS.	113
Tabelle 4:	Gerichtete Länge und Anteile (in Klammern) der Netzelemente und pro Straßenklasse.	114
Tabelle 5:	Varianten der AV-ready Netze für die Modellanwendung.	115
Tabelle 6:	PE-Faktoren der Fahrverhaltenslogiken für die Straßenklassen (n. a. für nicht automatisiert).	123
Tabelle 7:	Zuordnung der Fahrverhaltenslogiken zu den AV-Klassen.	123
Tabelle 8:	PE-Faktoren für AV-Klassen pro Straßenklasse (n. a. für nicht automatisiert).	123
Tabelle 9:	Name, Beschreibung und gewählte Parameter für die Einstellungen, die für die Wahrnehmung der automatisierten Fahrtzeit gelten sollen.	126
Tabelle 10:	Name, Beschreibung und Parameter für die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit für die Routenwahl.	127
Tabelle 11:	Abweichungen der Ergebnisse für Modus Pkw-Fahrer aus Kenngrößenmatrizen der Stichprobe mit und ohne Routenproportionalität.	133
Tabelle 12:	Abweichungen der Ergebnisse für Verkehrssysteme CV und AV aus der Netzauswertung der Stichprobe für die Region Stuttgart mit und ohne Routenproportionalität.	134
Tabelle 13:	Beschreibung zusätzlicher Szenarien.	136
Tabelle 14:	Mittlere Werte von Kenngrößen für Pkw-Fahrer des Basisszenarios.	142
Tabelle 15:	PE-Faktoren für AV-Klassen pro Straßenklasse (n. a. für nicht autom.).	143
Tabelle 16:	Name für angenommene Varianten der Zeitwahrnehmung in AV und zugehörige Parameter für Modellstufen.	143
Tabelle 17:	PE-Faktoren für AV pro Straßenklasse (n. a. für nicht automatisiert).	162
Tabelle 18:	Änderungen dreier Kenngrößen des Modus Pkw-Fahrer in Prevalent-Szenarien mit Netz N3 und N4 im Vergleich zum Basisszenario aus der Matrixauswertung.	165
Tabelle 19:	Änderungen der Verkehrsleistung des Modus Pkw-Fahrer im gesamten Netz und auf Straßenklasse S4 in der Region Stuttgart in Prevalent-Szenarien im Vergleich zu Base aus der Netzauswertung.	166
Tabelle 20:	Parameter für veränderte Zeitwahrnehmung in AV für Szenariengruppen Orig, Orig-t5 und Orig-t0 und verschiedene Modellstufen.	171
Tabelle 21:	Anteile der Wege mit AV, die von empfundenen Fahrtzeitvorteilen profitieren können.	172
Tabelle 22:	Änderungen zu Base für 100 % AV und drei Kenngrößen des Modus Pkw-Fahrer.	173

Tabelle 23:	Szenariengruppen und zugehörige Eckdaten für Modellanwendung	203
Tabelle 24:	Straßenklassen, AV-ready Netzzugehörigkeit und PE-Faktoren für alle Szenariengruppen (mod. für modifiziert, n. a. für nicht automatisiert)	203
Tabelle 25:	Parameter für angepasste Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit	203
Tabelle 26:	Modal-Split Verkehrsaufkommen und Änderung Pkw-Fahrer zu Base.	211
Tabelle 27:	Modal-Split Verkehrsleistung, normiert auf Base \triangleq 100	216
Tabelle 28:	Modal-Split Verkehrszeitaufwand, normiert auf Base \triangleq 100	221
Tabelle 29:	Diverse gemittelte Kenngrößen aus Matrizenauswertungen	226
Tabelle 30:	Fahrtweitenverteilung für Pkw-Wege (FW: Fahrtweite)	231
Tabelle 31:	Fahrtzeitenverteilung für Pkw-Wege (FZ: Fahrtzeit)	236
Tabelle 32:	Aufteilung der Pkw-Fahrleistung auf Gebiete bzw. Straßenklassen in der Region Stuttgart aus der Netzauswertung	241
Tabelle 33:	Aufteilung des Pkw-Zeitaufwands auf Gebiete bzw. Straßenklassen in der Region Stuttgart aus der Netzauswertung	246

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung des Fundamentaldiagramms (FGSV (2005a)).	25
Abbildung 2:	Modell zur Beschreibung des Verkehrsablaufs (GREENSHIELDS ET AL. (1935)).	26
Abbildung 3:	Kapazitätsverteilung für zwei Autobahnabschnitte bei Köln (BRILON ET AL. (2005)).	27
Abbildung 4:	q-v-Diagramm mit Messdaten (Punkte „actual“) und Funktionskurve (Linie „predicted“) für einen Autobahnabschnitt bei Toronto, Kanada (VAN AERDE (1995)).	29
Abbildung 5:	Kapazitätsbeschränkungsfunktionen des Typs BPR.	33
Abbildung 6:	Kapazitätsbeschränkungsfunktionen des Typs Lohse für eine kritische Auslastung von $x_s^{crit} = 1$.	34
Abbildung 7:	Bestandteile eines Verkehrsplanungsmodells (FRIEDRICH (2020)).	36
Abbildung 8:	Vereinfachtes Netzmodell.	39
Abbildung 9:	Ablauf der Modellstufen im Vier-Stufen Modell mit Rückkopplung (eigene Darstellung in Anlehnung an FRIEDRICH (2020)).	46
Abbildung 10:	Vorhersagen für Verfügbarkeit je nach Automatisierungsstufe (blaue Kreise entsprechen Prognosen, eigene Darstellung in Anlehnung an KLEIN UND ALTENBURG (2019)).	62
Abbildung 11:	Vorhersagen für Anteile hoch- und vollautomatisierter Fahrzeuge an Zulassungen, Bestand und Modal-Split der Fahrleistung (eigene Darstellung in Anlehnung an KLEIN UND ALTENBURG (2019)).	63
Abbildung 12:	Modellstufen und Komponenten in Verkehrsnachfragemodellen, die teilweise für AV angepasst werden müssen (blau).	88
Abbildung 13:	Verlauf von Fahrtzeiten auf Netzelementen bis zur empfundenen Fahrtzeitenmatrix für den Modus Pkw.	104
Abbildung 14:	Schematischer Verlauf der empfundenen Fahrtzeit für AV.	105
Abbildung 15:	Vereinfachtes Netzmodell mit Fahrtzeiten für eine Quelle-Ziel-Relation.	106
Abbildung 16:	Land- und Stadtkreise des Planungsraums der Region Stuttgart und des erweiterten Modellraums um die Region.	110
Abbildung 17:	Straßenklassen in und um den Planungsraum Region Stuttgart.	114
Abbildung 18:	Dreistreifiges Autobahnabschnittsnetz mit Aus- und Auffahrt und Messquerschnitten aus LOHMILLER ET AL. (2020).	119
Abbildung 19:	Beispiele für geschätzte q-v-Fundamentaldiagramme aus LOHMILLER ET AL. (2020), die als aussagekräftig (links), evtl. aussagekräftig (mittig) und nicht aussagekräftig (rechts) eingeordnet werden.	120
Abbildung 20:	Kapazitätswerte (q95) in Abhängigkeit des AV-Anteils für drei AV-Fahrverhaltensmodelle aus LOHMILLER ET AL. (2020).	121
Abbildung 21:	Arbeitsschritte für die Bestimmung der PE-Faktoren für AV.	124
Abbildung 22:	Vorgehen für die Berechnung der empfundenen Fahrtzeitenmatrix für den Modus Pkw-Fahrer.	129

Abbildung 23: Aufteilung der Nachfrage zweier Verkehrssysteme auf zwei Routen.	132
Abbildung 24: Zusammensetzung der Szenarien.	135
Abbildung 25: Modal-Split für die Region und Stadt Stuttgart.	141
Abbildung 26: Aufteilung der Pkw-Fahrleistung und des Pkw-Zeitaufwands auf Gebiete und Straßenklassen aus der Netzauswertung.	141
Abbildung 27: Fahrtweiten- und Fahrtzeitenverteilung für Wege des Modus Pkw-Fahrer im Basisszenario.	142
Abbildung 28: Modal-Split Verkehrsaufkommen für normal.	145
Abbildung 29: Modal-Split Verkehrsleistung für normal, normiert auf Base \triangleq 100.	147
Abbildung 30: Modal-Split Verkehrszeitaufwand für normal, normiert auf Base \triangleq 100.	149
Abbildung 31: Modal-Split Verkehrsaufkommen für red-15.	151
Abbildung 32: Modal-Split Verkehrsleistung für red-15, normiert auf Base \triangleq 100.	153
Abbildung 33: Modal-Split Verkehrszeitaufwand für red-15, normiert auf Base \triangleq 100.	155
Abbildung 34: Modal-Split Verkehrsaufkommen für red-30.	157
Abbildung 35: Modal-Split Verkehrsleistung für red-30, normiert auf Base \triangleq 100.	159
Abbildung 36: Modal-Split Verkehrszeitaufwand für red-30, normiert auf Base \triangleq 100.	161
Abbildung 37: Szenarienreihe Prevalent-Extreme mit AV-ready Netz N4.	163
Abbildung 38: Fahrzeugbelastung und Änderung zu Base im Netz der Region Stuttgart für Prevalent-Extreme mit 100 % AV, red-30 (Hintergrundkarte: © OpenStreetMap-Mitwirkende, www.openstreetmap.org/copyright).	166
Abbildung 39: Auf Base \triangleq 100 normierte Anteile des Modus Pkw-Fahrer für Szenarien der Gruppe Original.	169
Abbildung 40: Pkw-Fahrleistung pro Straßenklassen für Base und Orig-(60)-Szenarien mit verschiedenen AV-ready Netzen (*Umlegung ohne angepasste Widerstandsfunktionen für Zeitwahrnehmung).	170
Abbildung 41: Auf Modus Pkw-Fahrer in Base \triangleq 100 normierte Anteile der Pkw-Fahrer für Szenarien der Gruppen Introductory, Established und Prevalent	177

Kurzfassung

Mit der fortschreitenden Entwicklung in der Fahrzeugtechnik wird sich in den kommenden Jahren die Funktionalität von Pkw und damit deren Nutzung verändern. Noch sind die Auswirkungen der Fahrzeugautomatisierung auf Verkehrsablauf und Mobilitätsverhalten nur unzureichend bekannt. Dies erschwert eine Prognose der künftigen Verkehrsnachfrage. Verkehrsnachfragemodelle können Planern und Entscheidungsträgern helfen, mögliche Auswirkungen technischer Entwicklungen bei automatisierten Fahrzeugen (AV) und zugehöriger regulatorischer Maßnahmen auf den zukünftigen Verkehr besser zu verstehen.

Automatisierte Fahrzeuge werden ein anderes Fahrverhalten als Menschen zeigen und folglich Fahrtzeiten im Verkehrsnetz in Abhängigkeit des Anteils dieser Fahrzeuge in der Fahrzeugflotte verändern. Diese Einflussgrößen müssen auf geeignete Weise in vorhandene Fahrzeitermittlungsmodelle integriert werden.

Hochgradig automatisierte Fahrzeuge erlauben es den Personen, die sonst die Fahraufgabe übernehmen, einen Teil der im Fahrzeug verbrachten Zeit mit anderen Aktivitäten zu verbringen. Dies führt zu der Annahme, dass sich die Wahrnehmung der Fahrzeit in AV von derjenigen in konventionellen Fahrzeugen unterscheidet.

Änderungen von tatsächlichen oder empfundenen Fahrtzeiten sind entscheidend für den Ablauf eines Verkehrsnachfragemodells, weil diese die Angebotsqualität beeinflussen, die sich durch Rückkopplung in der Nachfrageberechnung auf die Ziel-, Modus- und Routenwahl auswirkt. Damit wirken sich die erwähnten Einflussgrößen auf Mobilitätsverhalten und Verkehrsnachfrage aus. Verkehrsnachfragemodelle müssen diese Einflüsse adäquat abbilden können. Dies führt zur Notwendigkeit, die Modelle dafür zu erweitern, sodass Nachfragewirkungen automatisierter Fahrzeuge abgeschätzt werden können.

In dieser Arbeit werden Modellierungsmethoden vorgestellt, um die Eigenschaften und Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle zu integrieren. Der Zweck dieser Methoden ist es, den Personen, die solche bestehenden Modelle anwenden, eine Möglichkeit zur Erweiterung dieser aufzuzeigen, damit diese, basierend auf Annahmen oder Daten zu AV, Prognosen erstellen können.

Um die Wirkungen eines veränderten Fahrverhaltens von AV in Fahrzeitermittlungsmodellen zu berücksichtigen, wird das Konzept der Personenkraftwagen (Pkw)-Einheiten erweitert. Dieses Konzept umfasst die Umrechnung der Fahrzeuganzahl aller Fahrzeugtypen in die Einheit herkömmlicher Pkw. Die Leistungsfähigkeit eines AV wird dann über Pkw-Einheiten-Faktoren angegeben, die von der Funktionalität des Fahrzeugs und vom Typ der Straßenanlage abhängen.

Die Arbeit stellt auch eine Methode vor, um die Fahrtzeitwahrnehmung in AV, die nicht vollautomatisiert und damit Teil des Modus Pkw-Fahrer sind, anzupassen. Dafür wird die automatisierte Fahrtzeit mit einem zusätzlichen, vorzugebenden Parameter multipliziert. Dies wirkt sich auf die Routenwahl aus. Anhand des AV-Anteils werden die empfundenen Fahrtzeiten für konventionelle und automatisierte Fahrzeuge gewichtet gemittelt, um

empfundene Fahrtzeiten des Modus Pkw-Fahrer als Input für die Modellstufen der Ziel- und Moduswahl zu erhalten.

Der Wahrnehmungsparameter für die Modellanwendung in dieser Arbeit reduziert die empfundene automatisierte Fahrtzeit und folgt damit Erkenntnissen der Literaturobwertung. Die verwendeten Faktoren für die Pkw-Einheiten von AV werden durch die Auswertung von Daten mikroskopischer Verkehrsflusssimulationen ermittelt.

Beide Methoden werden im makroskopischen Verkehrsnachfragemodell des Verbands der Region Stuttgart angewendet, um Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge zu untersuchen. Der Anteil von AV an der privaten Pkw-Flotte wird vorgegeben. Im Rahmen dieser Arbeit sind AV hochautomatisiert und benötigen daher immer eine Person mit Fahrerlaubnis und Pkw-Verfügbarkeit.

Für automatisierte Fahrzeuge der ersten Generation wird ein vorsichtigeres Fahrverhalten zugrunde gelegt. Diese beeinflussen dadurch den Verkehrsablauf im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen negativ und verursachen Fahrtzeitverlängerungen. Bei dieser geringeren Leistungsfähigkeit von AV gehen Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung für Pkw-Modi geringfügig zurück. Mit fortschreitender technologischer Entwicklung kann das Fahrverhalten so verbessert werden, dass AV leistungsfähiger als CV sind und den Verkehrsablauf positiv beeinflussen können. Das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistung der Pkw-Modi nehmen zu. Die Wirkungen fallen mit steigendem AV-Anteil stärker aus.

Eine veränderte Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit, sodass diese als kürzer empfunden wird, erhöht die empfundene Angebotsqualität und Erreichbarkeit von Zielen und macht den Modus Pkw-Fahrer damit attraktiver. Aufgrund von dadurch ausgelösten Änderungen in der Ziel- und Routenwahl nehmen mittlere Fahrtweiten und die Verkehrsleistung zu.

Für die Ergebnisse ist es entscheidend, wie dicht das Straßennetz ist, das als automatisiert befahrbar zugrunde gelegt wird. Um von den Vorteilen automatisierten Fahrens profitieren zu können, sind Personen bereit, ihre Routenwahl anzupassen. Dies führt dazu, dass die Belastung auf den automatisiert befahrbaren Straßen im Verhältnis stärker zunimmt.

Die Modellergebnisse zeigen, dass aufgrund der fortschrittlichen Fähigkeiten hochautomatisierter Fahrzeuge die Pkw-Verkehrsleistung in der Region Stuttgart um etwa 18 % zunehmen könnte. Die Vorteile des automatisierten Fahrens für die Personen, die diese nutzen, bringen also auch erhebliche negative Auswirkungen mit sich, die aus der Zunahme des Straßenverkehrs resultieren.

Die Erkenntnisse der Modellanwendung können als Grundlage für die Diskussion über geeignete Maßnahmen aus der Verkehrsplanung dienen, um negative Folgen der Fahrzeugautomatisierung abzumildern oder zu vermeiden. Solche Maßnahmen müssen die Nutzung der zum Pkw konkurrierenden Modi attraktiver machen. Dies kann mit der Förderung anderer Verkehrsmodi oder der Einschränkung der Pkw-Nutzung erreicht werden.

Abstract

With the ongoing development in vehicle technology, the functionality of passenger cars and the way cars are used will change in the coming years. The impacts of vehicle automation on traffic flow and mobility behavior are insufficiently known. This makes it difficult to forecast future travel demand. Travel demand models can help planners and decision-makers to better understand the potential impact of technical developments of automated vehicles (AV) and related regulatory measures on future traffic.

Automated vehicles will show a different driving behavior than humans and consequently change travel times in the transportation network depending on the AV-share in the vehicle fleet. These influencing variables must be integrated into existing travel time determination models in a suitable manner.

High level automated vehicles allow the driver to spend part of the in-vehicle time on other activities. This leads to the assumption that the perception of automated driving time differs to the perception of manual driving time.

Changes in actual or perceived travel times are critical to the procedure of a travel demand model because they influence the quality of supply, which affects destination, mode, and route choice through feedback in the demand calculation. Thus, the mentioned influencing variables have an impact on mobility behavior and travel demand. Travel demand models must be able to include such impacts. This leads to the necessity to extend these models to enable them to estimate impacts of automated vehicles on travel demand.

This thesis proposes modeling methods to integrate the characteristics and effects of automated vehicles into macroscopic traffic demand models. The purpose of these methods is to show modelers how to extend existing models so that they can provide forecasts based on assumptions or data on AV.

An extension of the concept of passenger car units can incorporate effects of different AV driving behaviors in travel time determination models. This concept includes the conversion of the number of vehicles of all vehicle types into the unit of conventional passenger cars. The performance of an AV is represented through specific passenger-car-unit-factors, which depend on the functionality of the vehicle and the roadway type.

The thesis also presents a method to adjust the travel time perception in AV that are not fully automated and thus part of the mode car driver. For this purpose, the automated travel time is multiplied by an additional parameter specified by the modeler. This affects route choice. Based on the AV-share, the perceived travel times for conventional and automated vehicles are weighted to provide the perceived travel time for the mode car-driver as input for the modelling steps destination and mode choice.

The perception parameter for the model application in this thesis reduces the perceived automated travel time by following the findings from the literature review. The passenger-car-unit-factors used for AV are obtained by evaluating data from microscopic traffic flow simulations.

Both methods are applied to the macroscopic travel demand model of the Stuttgart Region to investigate impacts of automated vehicles. The AV-share in the private car fleet is an input. Within this thesis, AV are highly automated and therefore still require a person with a driving license and a car available.

It is assumed that first-generation AV show a rather cautious driving behavior. Compared to conventional vehicles, they have a negative impact on traffic flow and cause increasing travel times. With the lower performance of AV, the number of trips and the total distance travelled decrease slightly for car modes. As technology advances, the driving behavior can be improved so that AV drive more efficient and positively influence traffic flow. Hence, the number of trips and the total distance travelled increase for car modes. The magnitude of the effects correlates with the AV-share.

The reduction of the perceived automated travel time increases the perceived quality of supply and the accessibility of destinations and therefore makes the car modes more attractive. Due to related changes in destination and route choice, mean trip lengths and total distance travelled increase.

An important factor for the model results is the density of the road network that is defined as being suitable for automated driving. In order to benefit from the advantages of automated driving, people are willing to adjust their route choice. As a result, traffic volumes on the roads that are suitable for automated driving comparatively increase to a greater extent.

The model results show that the advanced capabilities of highly automated vehicles may lead to an increase of passenger car traffic in the Stuttgart Region by about 18%. Thus, the benefits of automated driving for the people who use AV also come with substantial negative impacts resulting from the increase in road traffic.

The findings of the modal application can serve as a basis for a discussion of appropriate measures from transport planning to mitigate or avoid negative consequences of vehicle automation. Such measures must improve the attractiveness of modes competing with the passenger car. This can be achieved by encouraging the use of other modes of transport or restricting the use of cars.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Problemstellung

Automatisierte Fahrzeuge sind in der Lage, die Fahraufgabe, je nach Automatisierungsgrad und Umgebung, teilweise oder vollständig zu übernehmen. Sie haben das Potenzial, das Verkehrsangebot zu verändern und die Verkehrsnachfrage zu beeinflussen. Die Wirkungen auf Verkehrsangebot und -nachfrage sind für vollautomatisierte Fahrzeuge am größten, da diese unter allen Bedingungen und überall eigenständig fahren können. Damit sind neue Dienstleistungen, die den Pkw für alle zugänglich machen und eine neue Form der individuellen Mobilität ermöglichen, denkbar. Bis jedoch solche Fahrzeuge verfügbar sind, werden ihnen einige Generationen von automatisierten Fahrzeugen (AV für automated vehicles), die eine Person mit Fahrerlaubnis benötigen, vorausgehen. Es wird vermutlich einen längeren Zeitraum geben, in dem AV die vorhandene Infrastruktur mit konventionellen Fahrzeugen (CV für conventional vehicles) gemeinsam nutzen. Mit der Weiterentwicklung bereits verfügbarer Fahrzeuge mit Fahrassistenzfunktionen wird diese Situation schon bald zur Realität.

Die Wirkungen automatisierter Fahrzeuge auf die Verkehrsnachfrage hängen von vielen Einflussgrößen ab, deren Ausprägung heute nicht oder nur unzureichend bekannt ist. Aufgrund zunehmender Unterschiede im Fahrverhalten im Vergleich zu CV werden hochautomatisierte Fahrzeuge den Verkehrsfluss und damit die Leistungsfähigkeit von Verkehrsanlagen beeinflussen. Es ist auch ein erhöhter Reisekomfort für Fahrten mit AV denkbar, weil Personen auf bestimmten Teilen des Straßennetzes die Fahraufgabe an das Fahrzeug abgeben und eine gewisse Zeit für andere Aktivitäten im Fahrzeug nutzen können. Für beide Umstände sind Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage zu erwarten.

Um die Wirkungen von Angebotsänderungen auf die Verkehrsnachfrage zu quantifizieren, werden in vielen Städten und Regionen makroskopische Verkehrsnachfragemodelle, die auf dem Vier-Stufen-Modell (BATES (2007)) basieren, eingesetzt (MOECKEL ET AL. (2019)). Mit diesen Modellen können auch siedlungsstrukturelle, infrastrukturelle oder monetäre Maßnahmen untersucht und Prognosen getroffen werden. Die Ergebnisse, die Modell Anwender damit produzieren, können in der Verkehrspolitik als Entscheidungshilfe dienen.

Verkehrsnachfragemodelle können keine Aussagen zu den Ausprägungen der Einflussgrößen machen, wie beispielsweise die Änderung der Leistungsfähigkeit von AV oder der Zeitwahrnehmung in AV. Sie können aber einen Rahmen bieten, um die Ausprägungen dieser Einflussgrößen systematisch zu untersuchen und auf diese Weise Aussagen zu möglichen Auswirkungen zu machen.

Die Möglichkeit, geeignete Untersuchungen durchführen zu können, setzt allerdings voraus, dass die Modelle grundsätzlich dazu in der Lage sind, Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage adäquat abzubilden. Sie müssen nicht nur den heutigen Zustand mit der verfügbaren Fahrzeugtechnik und den gültigen Verkehrsregeln angemessen darstellen,

sondern auch zukünftige Zustände mit einer weiterentwickelten Fahrzeugtechnik und möglicherweise angepassten Verkehrsregeln.

Um potenzielle Auswirkungen von AV auf Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage abschätzen zu können, müssen Modelle folglich die Eigenschaften von AV ausreichend abbilden, in denen sie sich von CV unterscheiden könnten. Dazu gehören Verfügbarkeit, Leistungsfähigkeit, Kosten und Komfort.

Aus der beschriebenen Problemstellung ergibt sich unmittelbar die Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit.

1.2 Motivation und Zielsetzung

Die Integration der Eigenschaften von AV in diese Verkehrsnachfragemodelle erfordert eine Anpassung bestehender Modellierungsmethoden.

In dieser Arbeit werden Methoden vorgestellt, mit denen vorhandene makroskopische Verkehrsnachfragemodelle für den Personenverkehr so erweitert werden können, dass mit ihnen die Nachfragewirkungen von automatisierten Fahrzeugen abgeschätzt werden können.

Die Erweiterungen decken die folgenden Anwendungsbereiche ab:

- Analyse der Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen auf den Verkehrsfluss und damit auf die Leistungsfähigkeit von Verkehrsanlagen.
- Analyse der Nachfragewirkungen von automatisierten Fahrzeugen, die auf Teilen des Netzes automatisiert fahren können, aber weiterhin eine Person mit Fahrerlaubnis benötigen.
- Ermittlung der Änderungen der Verkehrsleistung (Personenkilometer und Fahrzeugkilometer) und des Verkehrszeitaufwands (Personenstunden und Fahrzeugstunden) in einem Untersuchungsgebiet.
- Analyse der Wirkungen regulierender Maßnahmen, z. B. politikbezogene Einschränkungen für AV zum automatisierten Betrieb auf bestimmten Straßenabschnitten.

Um die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Modellerweiterungen zu gewährleisten und exemplarisch mögliche Nachfragewirkungen von AV aufzuzeigen, werden diese Erweiterungen in das makroskopische Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart integriert. Dafür ist es vonnöten einige Annahmen zu treffen. Diese orientieren sich, soweit möglich, an Erkenntnissen aus der Literatur. Die Modellanwendung variiert u. a. AV-Anteile, AV-Fahrzeugklassen und das Netz, auf dem diese automatisiert fahren können.

Die Methoden und Annahmen fokussieren dabei vollständig auf das Einbinden von Fahrzeugen, die immer noch eine fahrende Person mit Fahrerlaubnis erfordern. Ein Teil der Weiterentwicklungen kann auch auf vollautomatisierte Fahrzeuge übertragen werden. Vollautomatisierte Fahrzeuge, die kein Fahrpersonal benötigen, ermöglichen neue Verkehrsangebote. Dazu gehören insbesondere geteilte Fahrzeugflotten für Carsharing-

oder Ridepooling-Angebote. Das erfordert zusätzliche Modellerweiterungen, auf die in Kapitel 4.1.2 eingegangen wird.

Die vorliegende Arbeit basiert zu Teilen auf Ergebnissen des Projektes CoEXist (h2020-coexist.eu). Das Projekt wurde von der EU im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogramms Horizon 2020 gefördert. Ein Ziel des Projektes war es, mikroskopische Verkehrsflussmodelle und makroskopische Verkehrsnachfragemodelle so zu erweitern, dass die Eigenschaften von AV integriert und somit Wirkungen auf Städte und Regionen abgeschätzt werden können.

1.3 Aufbau der Arbeit

Nachdem in Kapitel 1 die Problemstellung umrissen und das Ziel der Arbeit klargemacht wird, greift Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen auf, die für das Verständnis der Arbeit die Basis bilden. Dabei sollen zentrale Begriffe definiert und eine Auswahl an Modellen und Verfahren, die in der Verkehrsnachfragemodellierung Anwendung finden, vorgestellt werden. Diese Auswahl deckt Teilbereiche ab, die im Kontext der angenommenen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge genauer betrachtet werden sollten und in Zukunft möglicherweise einer Anpassung bedürfen.

Kapitel 3 setzt den Fokus dann auf automatisierte Fahrzeuge und erläutert zugehörige Begrifflichkeiten. Ebenfalls werden möglichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge im Verkehrszusammenhang dargelegt, Modellierungsstudien vorgestellt und deren Ergebnisse diskutiert.

In Kapitel 4 werden die Modellierungsmethoden zur Integration der Eigenschaften automatisierter Fahrzeuge in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle vorgestellt.

Ein Teil dieser Methoden kommt bei der Anwendung in Kapitel 5 zum Einsatz. Dort werden die für die Umsetzung der Methoden relevanten Annahmen erläutert sowie der Aufbau der betrachteten Szenarien skizziert. Sämtliche Ausprägungen zentraler Annahmen sind auf einem Merkblatt gesammelt, das auch als Lesehilfe für Diagramme genutzt werden kann und im Anhang A1 zu finden ist.

Kapitel 6 beinhaltet die Vorstellung und Interpretation der Modellergebnisse.

Kapitel 7 umfasst ein Fazit zur Arbeit, den Ausblick und weiteren Forschungsbedarf.

2 Grundlagen

Die Definition zentraler Begriffe, die Vorstellung für die Arbeit relevanter Konzepte und Verfahren sowie ein Überblick zu Verkehrsplanungsmodellen sind Bestandteile dieses Kapitels.

2.1 Verkehrsstärke, Kapazität und Leistungsfähigkeit

Zunächst werden die Begriffe Verkehrsstärke, Kapazität und Leistungsfähigkeit definiert. Es folgt die Vorstellung des Konzepts der Pkw-Einheiten, mit dem sich Verkehrsstärke und Kapazität vereinheitlichen lassen. Anschließend wird aufgezeigt, wie sich die Kapazität ermitteln lässt.

2.1.1 Definition

Mit der Größe Verkehrsstärke wird ausgedrückt, wie viele Verkehrselemente eines Verkehrsstroms je Zeiteinheit einen Querschnitt passieren (FGSV (2020a)). Als konkrete Angabe für die Verkehrsstärke findet sich häufig die Einheit Fahrzeuge pro Stunde.

Im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) welches von der deutschen Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) herausgegeben wird, wird die Kapazität als „die größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom bei gegebener entwurfstechnischer Gestaltung und Verkehrssteuerung, trockener Fahrbahn und Helligkeit in einem Zeitintervall an einem Querschnitt erreichen kann“ (FGSV (2015)), definiert. Im Highway Capacity Manual (TRB (2010)) findet sich, frei übersetzt, eine inhaltlich praktisch gleiche Definition. Dort wird die Kapazität als die maximale zu erwartende Verkehrsstärke, mit der Fahrzeuge einen Querschnitt während eines bestimmten Zeitraums unter den vorherrschenden Fahrbahn-, Umgebungs-, Verkehrs- und Steuerungsbedingungen überqueren können, beschrieben.

Beide Erläuterungen lassen den Schluss zu, dass es sich um einen konkreten Wert handelt, sofern die äußeren Bedingungen konstant sind. Die Beobachtungen mehrerer Studien (LORENZ UND ELEFTERIADOU (2000), BRILON ET AL. (2005)) zeigen, dass die maximale Verkehrsstärke auch unter konstanten äußeren Bedingungen variiert. Sie führen das Konzept der stochastischen Kapazität ein, um den Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und der Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs besser abzubilden.

Im HBS (FGSV (2015)) wird ebenfalls ausgeführt, dass aufgrund unterschiedlicher Verhaltensweisen der Verkehrsteilnehmer die Kapazität nicht als konstante Größe zu verstehen ist, sondern die im Handbuch enthaltenen Werte lediglich im Mittel zu erwarten sind. Beispiele für Einflussgrößen der Verhaltensweise sind der Fahrtzweck und die

Ortskenntnis. Letztere wird auch durch die Erkenntnisse von LOHMILLER (2014) bestätigt, der feststellt, dass die Kapazität eines Autobahnabschnittes bei wenig Regionalverkehr um 5 % geringer ist als bei mittlerem und viel Regionalverkehr. Eine ortskundige Population fahrender Personen wirkt sich demnach positiv auf den Verkehrsablauf und damit auf die Kapazität aus.

Der Begriff der Leistungsfähigkeit ist bisher kaum in den gängigen, deutschen Regelwerken zu finden. Die FGSV (2005a) beschreibt ihn mit dem Produkt aus Fahrzeuganzahl und mittlerer Geschwindigkeit. Die vorliegende Arbeit übernimmt diese Definition. Die Leistungsfähigkeit setzt Verkehrsnachfrage (Fahrer- bzw. Fahrzeugpopulation) und Verkehrsangebot (Kapazität) ins Verhältnis und kann mit der Kenngröße Fahrzeuge multipliziert mit dem Weg geteilt durch die Zeit angegeben werden.

Die Beziehung zwischen Nachfrage, Kapazität und Leistungsfähigkeit lässt sich auf zweierlei Arten interpretieren. Die Leistungsfähigkeit hängt entweder von variablen Kapazitätswerten ab oder wird durch die Fähigkeit der Nachfragezusammensetzung beschrieben, eine gegebene (konstante) Kapazität zu nutzen.

2.1.2 Konzept der Pkw-Einheiten

In der Realität nutzen üblicherweise verschiedene Verkehrssysteme gleichzeitig die vorhandene Infrastruktur. Ein typisches Beispiel stellt das Befahren des Straßennetzes von Leicht- und Schwerverkehr dar. Aufgrund deren unterschiedlicher Fahrverhalten und Fahrzeugeigenschaften reicht es nicht aus, lediglich die Anzahl der Fahrzeuge zur Angabe von Kapazität und Verkehrsstärke heranzuziehen. Daher wird die Anzahl an Fahrzeugen sämtlicher zu berücksichtigender Verkehrssysteme auf eine vergleichbare, einheitliche Größe umgerechnet. Diese Größe wird mit Pkw-Einheiten (PE), zu Englisch *passenger car equivalents* (PCE) oder *passenger car units* (PCU), angegeben. Dieses Konzept wurde erstmals im Highway Capacity Manual für die Umrechnung von Lastkraftwagen (Lkw) und Bussen auf Schnellstraßen vorgestellt (HIGHWAY RESEARCH BOARD (1965)).

$$x_s = \frac{\sum_{i \in VSys} q_{s,i} \cdot f_i^{PE}}{q_s^{\max}} \quad (1)$$

mit

x_s	Auslastung auf Netzelement s
q_s	Verkehrsstärke auf Netzelement s in Fahrzeugen pro Zeiteinheit
f_i^{PE}	PE-Faktor für Verkehrssystem ($VSys$) i in PE pro Fahrzeug
q_s^{\max}	Kapazität von Netzelement s in PE pro Zeiteinheit

Formel (1) zeigt, wie die Auslastung berechnet wird, wenn das Konzept der Pkw-Einheiten umgesetzt wird. Die Kapazität ist in Pkw-Einheiten anzugeben. Für die Gesamtverkehrsstärke wird die Verkehrsstärke für jedes Verkehrssystem mit einem eigenen Faktor multipliziert. Beispiele für PE-Faktoren an signalisierten Knotenpunkten sind 1,0 für herkömmliche Pkw, 2,3 für schwere Nutzfahrzeuge und 0,4 für Motorräder (KIMBER ET AL. (1982)).

Bei gleichbleibender Kapazität und Verkehrsstärke in Fahrzeugen pro Zeiteinheit wird der Zusammenhang zwischen PE-Faktor und Leistungsfähigkeit klar. Ein im Vergleich kleinerer PE-Faktor verringert die Auslastung und sollte daher zu einer niedrigeren Fahrtzeit und höheren mittleren Geschwindigkeit führen und repräsentiert damit eine höhere Leistungsfähigkeit. Umgekehrt entspricht ein größerer PE-Faktor einer geringeren Leistungsfähigkeit, da die Auslastung und Fahrtzeit erhöht und die mittlere Geschwindigkeit verringert werden.

Auch wenn nach Kenntnis des Autors in Verkehrsnachfragemodellen, die auslastungsabhängige Modelle zur Fahrzeitermittlung nutzen, häufig konstante PE-Faktoren für Verkehrssysteme hinterlegt sind, wird in der Literatur oft darauf hingewiesen, dass diese diversen Abhängigkeiten unterliegen. Das Highway Capacity Manual (TRB (2010)) beschreibt das „passenger-car equivalent“ ebenfalls als abhängig von Straßentyp-, Verkehrszustands- und Steuerungsbedingungen. ELEFTERIADOU ET AL. (1997) zeigen auf Basis von Simulationen, dass PE-Faktoren für Lkw beispielsweise von der Anzahl der Fahrstreifen, der Steigung, der Länge auf der diese Steigung vorkommt, dem Verhältnis von Fahrzeugleistung zu -gewicht und der Fahrzeuglänge abhängen. Die Nutzung von Simulationen zur Bestimmung von PE-Faktoren ist verbreitet und bietet den grundsätzlichen Vorteil, ausreichend viele Daten mit verschiedenen Einstellungen erzeugen zu können. Allerdings ist es aufwendig, das Verkehrsverhalten der Verkehrssysteme für die Simulation zu validieren. KIMBER ET AL. (1985) führt aus, dass sich die Methode zur Bestimmung der PE-Faktoren auf die resultierenden Werte auswirkt.

ELEFTERIADOU ET AL. (1997) stellen eine Auswahl von Verfahren zur Bestimmung der PE-Faktoren vor. Im Folgenden wird eine auf Zeitlücken basierende Methode (als Headway-Based- oder auch Headway-Ratio-Methode bekannt) kurz vorgestellt, die erstmals von GREENSHIELDS ET AL. (1947) verwendet wurde. Zwar war damals noch nicht von Pkw-Einheiten die Rede, dennoch war das Bestimmen und Beschreiben der Kapazität signalisierter Knotenpunkte unter Vorkommen verschiedener Verkehrssysteme Forschungsgegenstand.

Die Headway-Ratio-Methode leitet aus dem Verhältnis der Bruttozeitlücken den Wert der Pkw-Einheiten ab. Eine Bruttozeitlücke bezeichnet dabei die Zeitdauer, die an einem Querschnitt zwischen der Ankunft der Vorderkante eines vorausfahrenden Fahrzeuges und der des Folgefahrzeuges gemessen werden kann. Die Bestimmung der Zeitlücke anhand anderer Fahrzeugkriterien (z. B. vordere oder hintere Räder) funktioniert analog, solange dasselbe Kriterium für beide Fahrzeuge herangezogen wird. Die Bruttozeitlücke wird von KIMBER ET AL. (1985) als unabhängig vom Verkehrssystem des Vorderfahrzeugs beschrieben. Für die Anwendung der Methode wird also die Kenntnis über die bei

gesättigtem Verkehrsfluss zum vorausfahrenden Fahrzeug durchschnittlich eingehaltenen Bruttozeitlücken von jeweils herkömmlichen Pkw und den Fahrzeugen des Verkehrssystems, deren PE-Faktor bestimmt werden soll, vorausgesetzt. Diese können mithilfe von Messungen in der Realität bestimmt werden. Der PE-Faktor des Verkehrssystems von Interesse entspricht schließlich dem Quotienten von zugehöriger Bruttozeitlücke zu jener Bruttozeitlücke, die Pkw einhalten.

2.1.3 Ermittlung der Kapazität

Die Kenntnis der Kapazität ist relevant für die verkehrliche Bewertung vorhandener Straßen und für den Entwurf und Bau neuer Straßen (LOHSE UND SCHNABEL (2011a)). Die Bewertung des Verkehrsablaufs für Autobahnabschnitte basiert im HBS (FGSV (2015)) auf dem Auslastungsgrad. Dieser wird, wie in Formel (1) gezeigt, über die Division der (Bemessungs-)Verkehrsstärke durch die Kapazität berechnet.

Verfahren zur Ermittlung der Kapazität für Strecken können in die zwei Kategorien der deterministischen und stochastischen Kapazitätsmodelle eingeteilt werden. Erstere unterstellen einen konstanten Wert für die Kapazität bei gegebenen Bedingungen. Stochastische Kapazitätsmodelle (LORENZ UND ELEFTERIADOU (2000), BRILON ET AL. (2005)) definieren die Kapazität als Verteilungsfunktion, weil so der Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und -zusammenbrüchen besser abgebildet werden kann.

Ausführlichere Beschreibungen und der Vergleich von Kapazitätsermittlungsverfahren sind in MINDERHOUD ET AL. (1996) und ASGHARZADEH UND KONDYLI (2018) zu finden. Ein Verkehrsflussmodell, auf dessen Basis die Kapazität deterministisch bestimmt werden kann, wird im nachfolgenden Kapitel 2.1.4 gesondert vorgestellt.

Deterministische Kapazitätsmodelle

Deterministische Kapazitätsmodelle leiten aus beobachteten Daten mit mathematischen Modellen Funktionen ab, die die Zusammenhänge des Fundamentaldiagramms abbilden. Im Fundamentaldiagramm wird die Beziehung zwischen Verkehrsstärke, Dichte und mittlerer Geschwindigkeit für stationäre Zustände dargestellt. Ein stationärer Zustand bedeutet, dass es sich um eine Art Gleichgewichtszustand handelt und somit diese verkehrlichen Kenngrößen für eine bestimmte Dauer als konstant angesehen werden können.

Eine Darstellung des Fundamentaldiagramms ist in Abbildung 1 zu finden. Die Messwerte des Verkehrsflusses sind dabei als Punktwolke aufgetragen. Der Wert der größten, beobachteten Verkehrsstärke q_{\max} tritt für die kritischen Werte der Geschwindigkeit v_{krit} und Dichte k_{krit} auf. Im Bereich um q_{\max} spricht man von teilgebundenem Verkehr. Weitere, eindeutig definierte Werte sind üblicherweise die Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss, in der Abbildung v_{frei} , und die größtmögliche Dichte k_{\max} (nicht in

Abbildung) für den vollständig gestauten Zustand. Bei hohen Geschwindigkeiten handelt es sich um den Zustand des freien Verkehrs und für hohe Dichten um gebundenen Verkehr.

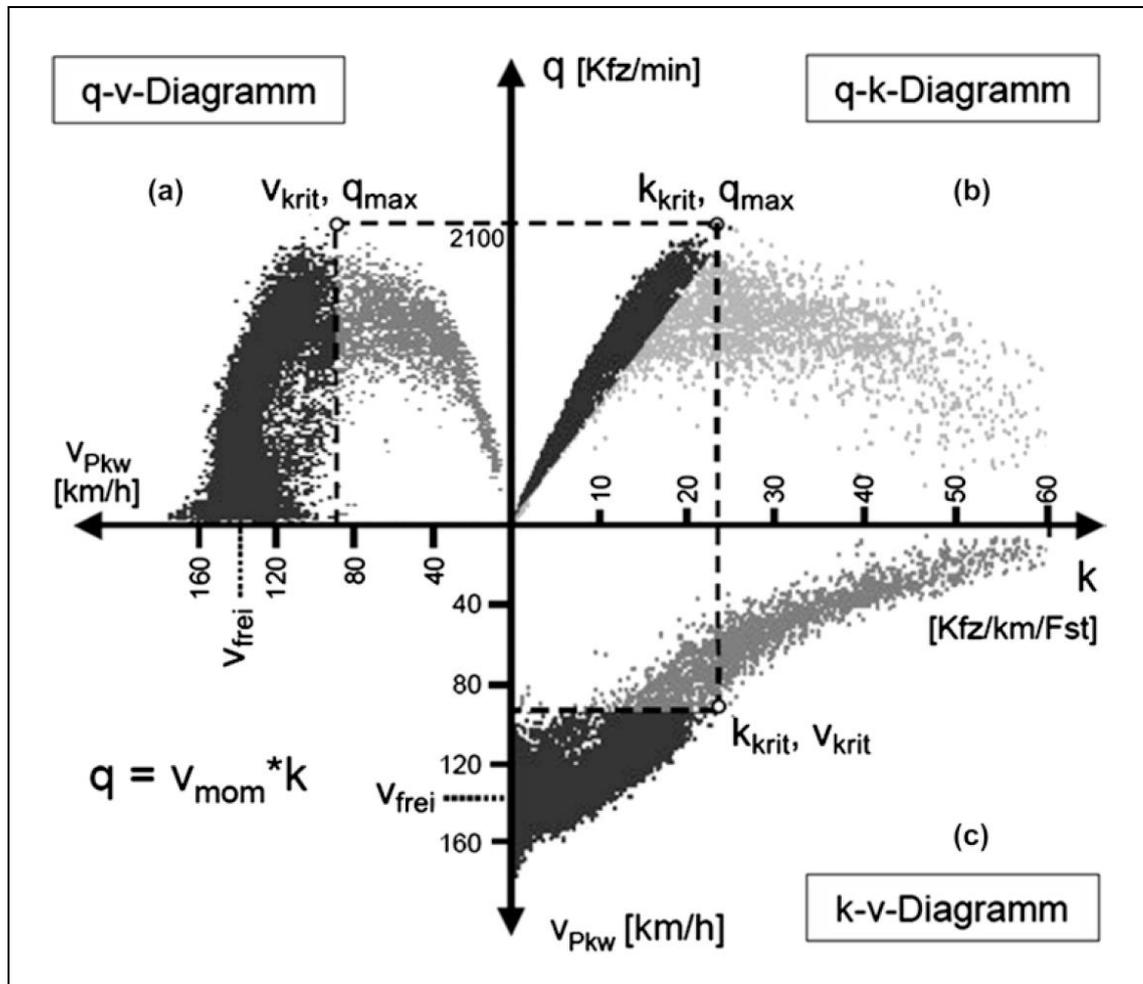


Abbildung 1: Darstellung des Fundamentaldiagramms (FGSV (2005a)).

Die Form der Punktwolken ist abhängig von den Randbedingungen, unter denen sie ermittelt wurden. Einflussgrößen sind Straßeneigenschaften (Geometrie, Geschwindigkeitsbegrenzung), Fahrzeugeigenschaften (Verkehrssystem), Eigenschaften fahrender Personen (Fahrtzweck, Ortskenntnis), Wetter und die Größe des Bezugsintervalls, innerhalb derer die Kenngrößen gemittelt wurden (FGSV (2005a)).

Die ersten Beobachtungen des Verkehrsablaufs samt der Entwicklung des zugehörigen mathematischen Modells stammen von GREENSHIELDS ET AL. (1935). Er stellt einen linearen Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit fest (Abbildung 2 links oben). Mit der Zustandsgleichung $q = v \cdot k$ leitet er damit parabolische Funktionen für die Verkehrsstärke in Abhängigkeit der Dichte (Abbildung 2 links unten) und Geschwindigkeit (Abbildung 2 rechts oben) ab. Der Scheitelpunkt dieser beiden parabolischen Kurven repräsentiert die Kapazität.

Seitdem wurden zahlreiche, weitere mathematische Modelle entwickelt, die diese Zusammenhänge beschreiben. Es sei hierfür auf LOHSE UND SCHNABEL (2011a) verwiesen.

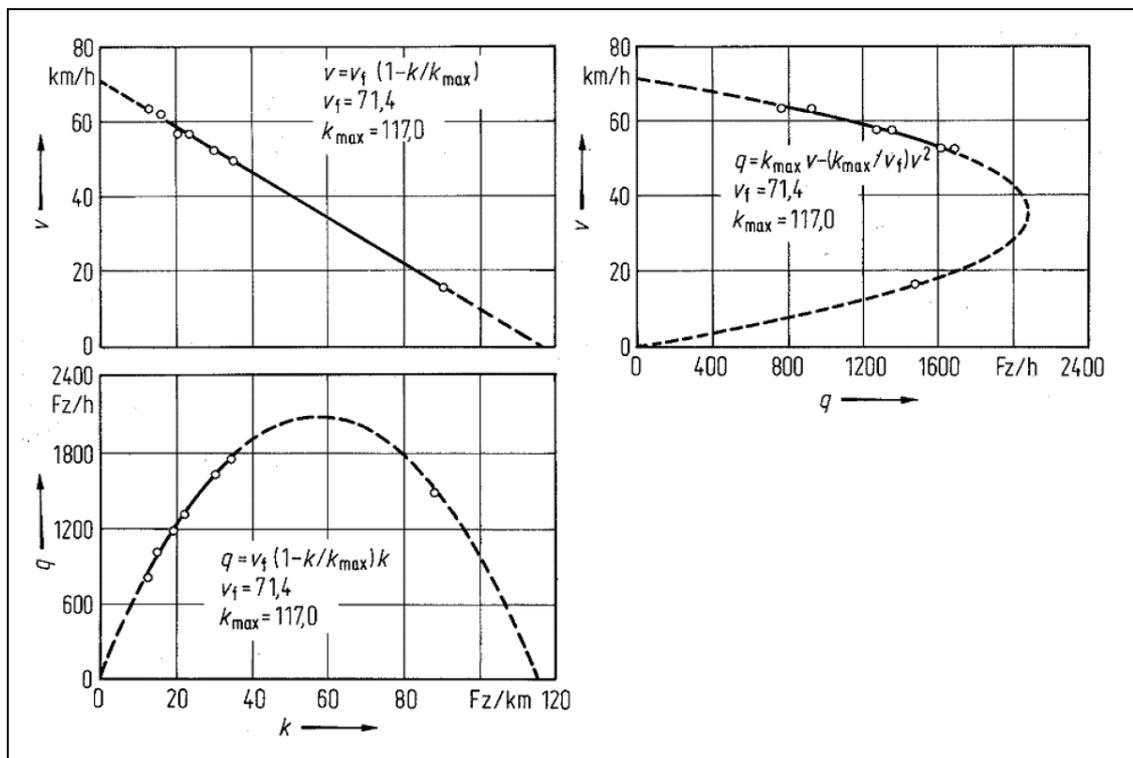


Abbildung 2: Modell zur Beschreibung des Verkehrsablaufs (GREENSHIELDS ET AL. (1935)).

Stochastische Kapazitätsmodelle

Diese Modellklasse behandelt die Kapazität als Zufallsgröße. Dabei wird mit Verteilungsfunktionen gearbeitet, die schlussendlich angeben sollen, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Verkehr bei einer gewissen Verkehrsstärke zusammenbricht. Die zugrundeliegende Annahme ist, dass das Überschreiten der Kapazität zu einem Verkehrszusammenbruch führt. Da die Verkehrsstärke und die Geschwindigkeit nach einem solchem Ereignis, also im gestauten Zustand, abnehmen (capacity-drop), lassen sich im Umkehrschluss die Werte für diese Kenngrößen vor dem Zusammenbruch identifizieren. Diesen Zusammenhang können sich stochastische Kapazitätsmodelle zunutze machen. Voraussetzung ist eine Erfassung der Größen in kleinen Zeitintervallen.

BRILON ET AL. (2005) entwickeln ein Modell zur Bestimmung der stochastischen Kapazität, welches stellvertretend hier im Folgenden vorgestellt wird. Sie nutzen die Product-Limit-Methode, die sie analog zur Statistik von Lebensdauerdaten auf den Verkehrskontext anwenden.

Die Theorie der Analyse von Lebensdauerdaten beschäftigt sich mit der Verteilung der Lebensdauer von Menschen oder Bauteilen. Darauf aufbauend wird eine Überlebensfunktion geschätzt, die Daten von Experimenten begrenzter Dauer verwendet. Bei Überleben des Menschen oder Bauteils während des Experiments ist die Lebensdauer

weiterhin unbekannt. Es handelt sich um sogenannte zensierte Daten. Daten zum Nicht-überleben geben die Lebensdauer an und werden als unzensierte Daten bezeichnet.

Übertragen auf den Verkehrsablauf entspricht das Überleben dem Zustand, bei dem die Kapazität nicht erreicht wird, es also im darauffolgenden Zeitintervall zu keinem Verkehrszusammenbruch kommt. Die Verkehrsstärken der Messintervalle unmittelbar vor einer Kapazitätsverminderung werden also den unzensierten Daten zugeordnet, weil diese so interpretiert werden, dass sie die Kapazitätsgrenze erreicht oder überschritten haben. Ein Zusammenbruch wird mit dem Unterschreiten eines Grenzwerts der mittleren Geschwindigkeit (z. B. 70 km/h für deutsche Autobahnen) in einem Zeitintervall definiert, sofern im Intervall davor der Grenzwert nicht schon unterschritten wurde.

Aufgrund einer begrenzten Datenmenge für sehr hohe Verkehrsstärken, kann die Verteilungsfunktion für die Kapazität mit der Product-Limit-Methode in der Regel nicht vollständig geschätzt werden. Dies ist auch für Beispiele aus Abbildung 3 an den schwarzen Funktionsverläufen zu sehen. Daher muss eine Verteilungsfunktion vorgegeben und deren Parameter geschätzt werden. Als passendste Variante stellt sich die Weibull-Verteilung heraus, deren Verteilungsfunktion mit einer Maximum-Likelihood-Schätzung bestimmt werden kann.

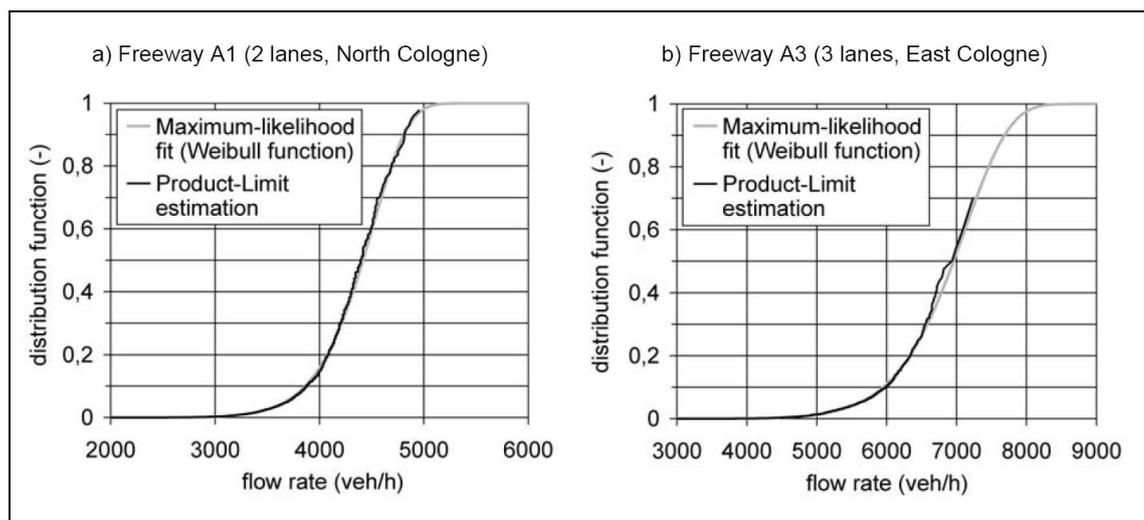


Abbildung 3: Kapazitätsverteilung für zwei Autobahnabschnitte bei Köln (BRILON ET AL. (2005)).

2.1.4 Das Verkehrsflussmodell nach van Aerde

VAN AERDE (1995) stellt ein Modell vor, welches alle Verkehrszustände (freier, teilgebundener, gebundener Verkehr) im Fundamentaldiagramm mit einer durchgehenden, stetigen Kurve beschreibt. Das zugrundeliegende Fahrzeugfolgmodell basiert auf einem dreiteiligen mikroskopischen Ansatz für den Abstand zwischen zwei Fahrzeugen. Die Bruttoweglücke setzt sich zusammen aus einem Parameter, einem von der Differenz von aktueller und freier Geschwindigkeit abhängigen Term und einem Term, der linear

zur Geschwindigkeit ist. Der Kehrwert der Bruttoweglücke ergibt die Dichte. Die zugehörige Funktion entspricht Formel (2).

$$k(v) = \frac{1}{c_1 + \frac{c_2}{v^0 - v} + c_3 \cdot v} \quad (2)$$

mit

k	Verkehrsdichte in Fzg/km
v	Momentane Geschwindigkeit in km/h
v^0	Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss in km/h
c_1	Parameter zum konstanten Fahrzeugabstand in km/Fzg
c_2	Parameter zur Differenz zur freien Geschwindigkeit in km ² /(h*Fzg)
c_3	Parameter zur Geschwindigkeit in h/Fzg

Durch den Zusammenhang der Zustandsgleichung $q = v \cdot k$ können die Funktionen für die Verkehrsstärke in Abhängigkeit der Dichte und Geschwindigkeit abgeleitet werden. Mithilfe empirischer Daten lassen sich unter Einsatz einer nichtlinearen Regressionsanalyse die Parameter schätzen. BRILON UND GEISTEFELDT (2010) empfehlen, Mittelwerte der Geschwindigkeit in Verkehrsdichteklassen zugrunde zu legen. LOHMILLER (2014) nutzt den Median statt des Mittelwerts, weil dieser nicht von Extremwerten verzerrt wird. Beide Untersuchungen betonen, dass eine realistische Beschreibung mit dem van Aerde-Modell nur gelingt, wenn es ausreichend viele Wertepaare im Bereich der Kapazität bzw. im zähfließenden und gestauten Zustand gibt.

Die Kapazität entspricht dem Scheitelpunkt der Kurve im Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramm und kann somit direkt abgelesen werden. Ein Beispiel für die Darstellung von Wertepaaren und Funktionsverlauf ist in Abbildung 4 zu sehen. Offensichtlich treten auch Verkehrsstärken auf, die über dem Kapazitätswert liegen.

Für den Fall, dass zu wenig Wertepaare für eine belastbare Parameterschätzung vorliegen oder die Punktwolke der Messwerte eine ausgeprägte Zweiteilung aufweist, schlagen BRILON UND GEISTEFELDT (2010) vor, auch die Werte des 99. und 95. Perzentsils der Verkehrsstärken heranzuziehen und mit der Kapazität nach dem van Aerde-Modell zu vergleichen.

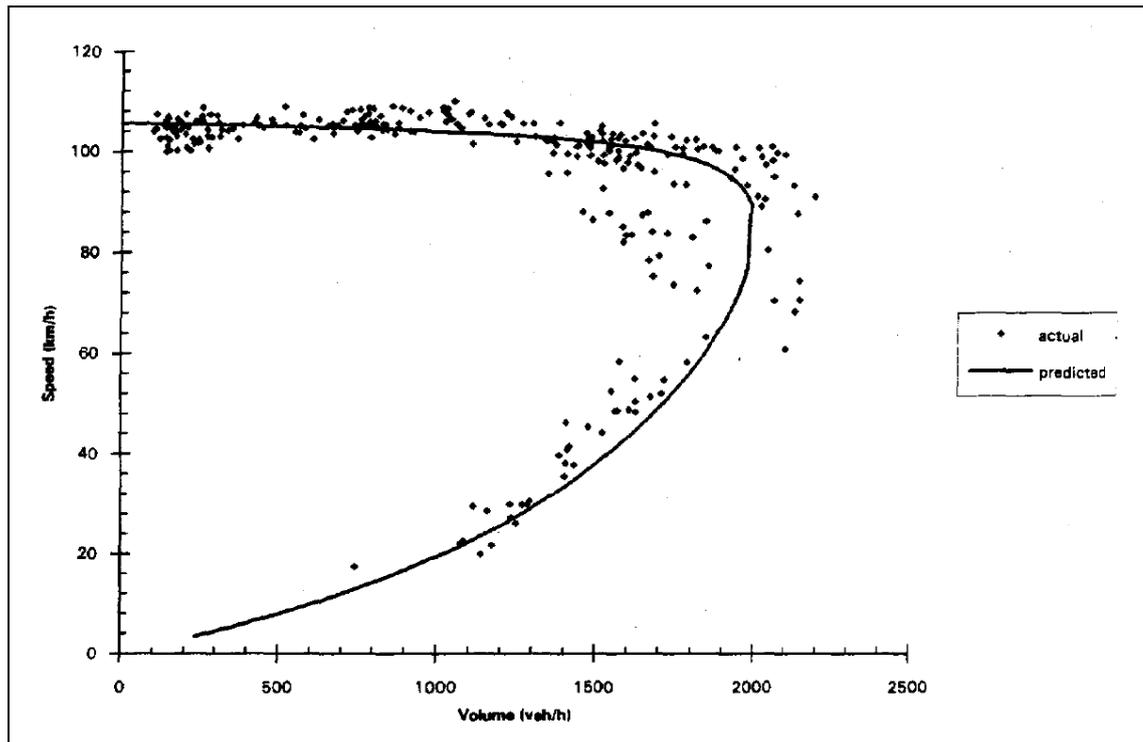


Abbildung 4: q-v-Diagramm mit Messdaten (Punkte „actual“) und Funktionskurve (Linie „predicted“) für einen Autobahnabschnitt bei Toronto, Kanada (VAN AERDE (1995)).

2.2 Fahrtzeitermittlungsverfahren

Die Fahrtzeit ist ein zentraler Bestandteil der Reisezeit. Abgesehen von der Fahrtzeit beinhaltet die Reisezeit neben Zu- und Abgangszeiten, im Fall von motorisiertem Individualverkehr (MIV), auch noch die Parksuchzeit (FGSV (2008)). In makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen lässt sich auch noch die Fahrtzeit im untergeordneten Netz unterscheiden, die auf Anbindungen entfällt. Anbindungen verbinden die Zentren von Verkehrszellen mit dem modellierten Netz.

Die Reisezeit dient Verkehrsteilnehmern, zusammen mit anderen Kriterien wie Kosten oder persönlichen Präferenzen, als Entscheidungsgrundlage für die Wahl von Modus, Ziel und Route bei Ortsveränderungen. Die Reisezeit ist eine wichtige Größe, um das Mobilitätsverhalten von Personen nachvollziehen und mithilfe von Modellen prognostizieren zu können.

Die Fahrtzeit kann auch als Kenngröße zur Bewertung der Verkehrsablaufqualität in Form von Einzelfahrtzeiten oder Fahrtzeitverteilungen herangezogen werden. Mit in der Realität gemessenen Fahrtzeiten lassen sich auch die Fahrtzeiten in Modellen validieren.

Dieses Kapitel soll dem Leser einen Überblick, zunächst losgelöst vom Gebiet der Verkehrsnachfragemodellierung, zu gängigen Fahrtzeitermittlungsverfahren geben und für die Arbeit relevante Modelle genauer vorstellen.

2.2.1 Überblick

Für eine ausführlichere Behandlung des Themas Fahrtzeitermittlung sei auf PETER ET AL. (2021) und FRIEDRICH ET AL. (2015) verwiesen. Die hier aufgeführte Zusammenfassung orientiert sich an Teilen beider Berichte.

Fahrtzeiten können grundsätzlich gemessen oder modelliert werden. Verfahren der Fahrtzeitmessung lassen sich in zwei Kategorien einteilen:

- **Fahrtzeitermittlung mit raumkontinuierlicher Fahrtzeitmessung:**
Die Fahrtzeiten werden aus dem Weg von Fahrzeugen kontinuierlich über Ortungsdienste erfasst. Daten aus derartigen Messungen liegen als Floating-Car-Daten (FCD) oder Floating-Smartphone-Daten (FSD) vor und werden z. B. von Google, TomTom, HERE oder INRIX angeboten.
- **Fahrtzeitermittlung mit raumdiskreter Fahrtzeitmessung:**
Die Fahrtzeiten werden aus mehrfachen, lokalen Erfassungen und der Wiedererkennung von Fahrzeugen abgeleitet. Die Erfassung kann z. B. über Kennzeichenerfassungssysteme (ANPR), Bluetooth, Fahrzeugsignaturen an Induktionsschleifen oder Floating-Phone-Daten (FPD) erfolgen. Zur Validierung können Messfahrten eingesetzt werden.

Modellbasierte Fahrtzeitermittlungsverfahren können ebenfalls in zwei Kategorien unterteilt werden:

- **Fahrtzeitermittlung mit verkehrszustandsbasierter Fahrtzeitmodellierung:**
Stationäre Detektoren erfassen den lokalen Verkehrszustand. Für die Berechnung der Fahrtzeit zwischen den Messstellen aus den dortigen Verkehrszuständen werden Rekonstruktions- oder Simulationsverfahren eingesetzt. Erstere nutzen grundlegende Zusammenhänge zwischen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlerer Geschwindigkeit aus, um Fahrtzeiten zu prognostizieren. Simulationsverfahren versuchen mithilfe von Verkehrsflussmodellen den realen Verkehrszustand parallel zur Zustandserfassung nachzubilden.
- **Fahrtzeitermittlung mit verkehrsnachfragebasierter Fahrtzeitmodellierung:**
Eingangsgößen für verkehrsnachfragebasierte Fahrtzeitermittlungsmodelle sind das Verkehrsangebot und die Verkehrsnachfrage. Das Verkehrsangebot wird durch die Eigenschaften der Verkehrsanlagen wie beispielsweise der Fahrstreifenanzahl und der zulässigen Geschwindigkeit repräsentiert. Die Verkehrsnachfrage umfasst die Fahrzeugpopulation und ggfs. die der fahrenden Personen und kann mit Verkehrsnachfragemodellen berechnet, mithilfe von Ganglinien gemessener Verkehrsstärken abgeschätzt oder direkt in der Realität gemessen werden.

Eine weitere Unterteilung von verkehrsnachfragebasierten Fahrzeitermittlungsmodellen lässt sich mit den Klassen auslastungsabhängige Modelle, Verkehrsflussmodelle und Warteschlangenmodelle vornehmen.

Auslastungsabhängige Modelle

Das HBS (FGSV (2015)) nutzt auslastungsabhängige Modelle, um die Verkehrsqualität auf Autobahnen zu bestimmen und zu bewerten. Diese Modellklasse berechnet die Fahrzeit mit Kapazitätsbeschränkungsfunktionen aus der Fahrzeit im unbelasteten Zustand und der Auslastung, welche sich aus der Division von Verkehrsstärke durch Kapazität ergibt. Im Kapitel 2.2.2 wird genauer auf Kapazitätsbeschränkungsfunktionen eingegangen.

Verkehrsflussmodelle

Makroskopische Verkehrsflussmodelle basieren auf dem Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte, Verkehrsstärke und Geschwindigkeit. Diese Kenngrößen sind auf lokaler Ebene aggregiert. Durch die räumliche und zeitliche Veränderbarkeit der Größen sind diese Flussmodelle in der Lage, Staus und Stoßwellen sowie deren Ausbreitungsgeschwindigkeit zu beschreiben (TREIBER UND KESTING (2010)). Die Fahrzeiten ergeben sich aus den mittleren Geschwindigkeiten jedes lokal abgegrenzten Abschnittes. Weitere Erläuterungen und Beispiele für Vertreter dieser Modellklasse sind in LOHSE UND SCHNABEL (2011a) und NEUHOLD (2018) zu finden.

Mikroskopische Verkehrsflussmodelle simulieren das Verhalten einzelner Fahrer-Fahrzeug-Einheiten. Das Fahrverhalten kann dabei durch einfache Regeln vorgegeben sein oder von komplexen Fahrzeugfolge- und Spurwechselmodellen bestimmt werden. Bekannte Beispiele für mikroskopische Verkehrsflussmodelle sind Zelluläre Automaten wie das Nagel-Schreckenberg-Modell oder das psycho-physische Abstandsmodell nach Wiedemann (TREIBER UND KESTING (2010)). Durch die Simulation der Bewegung von Einzelfahrzeugen sind sämtliche Einzelfahrtzeiten verfügbar, aus denen mittlere Fahrzeiten oder Fahrzeitverteilungen abgeleitet werden können.

Die Mischform zwischen makroskopischen und mikroskopischen Verkehrsflussmodellen stellen die mesoskopischen Verkehrsflussmodelle dar. Beispielsweise können in dieser Modellklasse die Parameter eines mikroskopischen Flussmodells von makroskopischen Größen wie der Dichte abhängen (TREIBER UND KESTING (2010)).

Warteschlangenmodelle

Makroskopische Warteschlangenmodelle sind geeignet, um Warteprozesse bei Verkehrsabläufen zu beschreiben. Ein Anwendungsbeispiel ist die Ermittlung von Verlustzeiten an Knotenpunkten, bei denen, im Gegensatz zur Verlustzeit auf Strecken, die auslastungsabhängige Verlustzeit nicht von der Grundwartezeit (bei Strecken die Fahrzeit bei freiem Verkehrsfluss) abhängt, sondern diese additiv ergänzt.

2.2.2 Kapazitätsbeschränkungsfunktionen

Kapazitätsbeschränkungsfunktionen, auch Capacity-Restraint (CR)-Funktionen genannt, werden im Rahmen von Verkehrsumlegungen für den Individualverkehr (IV) verwendet, um Fahrtzeiten zu bestimmen. In der englischsprachigen Literatur werden sie auch häufig als Volume-Delay-Function bezeichnet. Sie modellieren die bei zunehmender Verkehrsstärke ansteigende Fahrtzeit (bei Strecken) bzw. Wartezeit (bei Knotenpunkten).

Für den grundlegenden Zusammenhang gilt, dass die Fahrtzeit bzw. Wartezeit auf einem Netzelement s im belasteten Zustand von der Verkehrsstärke auf diesem Netzelement funktional abhängen, wie in Formel (3) zu sehen. Die Verkehrsstärke ist dabei die unabhängige Variable für die CR-Funktion f . Inputparameter für die Funktion, die vom Netzelement abhängen, sind die Fahrtzeit bzw. Wartezeit im unbelasteten Zustand bzw. bei freiem Verkehrsfluss t_s^0 und die Kapazität q_s^{\max} . Ergänzt werden CR-Funktionen durch weitere Funktionsparameter, deren Anzahl und Ausprägung je nach Art der CR-Funktion variieren. Diese Parameter entstammen Vorschlägen aus Regelwerken oder der Kalibrierung des Funktionsverlaufs mit beobachteten Daten.

$$t_s = f(q_s) \tag{3}$$

mit

- t_s Fahrtzeit auf Netzelement s für $q_s \neq 0$ in Sekunden
- q_s Verkehrsstärke auf Netzelement s in Pkw-Einheiten pro Zeiteinheit
- $f(q_s)$ CR-Funktion

Diese Funktion wird für jedes Netzelement separat angewendet. Somit sind die sich ergebenden Zeiten unabhängig von benachbarten Netzelementen.

Die Anforderung an CR-Funktionen besteht darin, für jegliche Verkehrsstärken, die resultierende Zeit realistisch zu beschreiben. Dies soll auch für den Überlastfall $q_s > q_s^{\max}$ gelten. Es gibt grundsätzlich keine absolute Obergrenze für Verkehrsstärken für Abbilden des Zusammenhangs zwischen Verkehrsstärke und Zeit mit CR-Funktionen. Es wird lediglich eine immer länger werdende Zeit berechnet. Allerdings kann es dabei zu unrealistischen Fällen kommen, wie beispielsweise eine Fahrtzeit auf einer Strecke, welche größer als der Umlegungszeitraum ist. Dies kommt einer unendlichen Stausituation gleich und kann zu Problemen bei Lösungsverfahren für Verkehrsumlegungen führen. Ferner muss die Funktion stetig und streng monoton steigend sein, damit Lösbarkeit und Konvergenz für die Verkehrsumlegung gegeben sind (SPIESS (1990)).

Formel (4) zeigt den Funktionsterm der BPR-Funktion als typisches Beispiel für eine CR-Funktion, die für Strecken eingesetzt wird (BUREAU OF PUBLIC ROADS (1964)). Es handelt sich um eine polynomische Funktion.

$$f^{BPR}(q_s) = t_s^0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q_s}{q_s^{\max}} \right)^\beta \right) \quad (4)$$

mit

- t_s^0 Fahrzeit auf Netzelement s für $q_s = 0$ in Sekunden
- $f^{BPR}(q_s)$ BPR-Funktion mit Funktionsparametern α und β
- q_s^{\max} Kapazität von Netzelement s in Pkw-Einheiten pro Zeiteinheit

Die zur Fahrzeit bei freiem Verkehrsfluss zusätzliche Fahrzeit im belasteten Zustand ist hauptsächlich abhängig vom Verhältnis der Verkehrsstärke zur Kapazität, d. h. von der Auslastung x_s eines Netzelements s . Für $q_s = q_s^{\max}$, also einer Auslastung $x_s = 1$, gibt der Parameter α vor, wie hoch der Aufschlag zu t_s^0 ausfällt. Formel (5) zeigt diesen Zusammenhang:

$$t_s^{BPR}(q_s = q_s^{\max}) = t_s^0 \cdot (1 + \alpha) \quad (5)$$

Der Parameter β setzt fest, in welchem Umfang eine Auslastung $x_s > 1$ die Fahrzeit verlängert. Große Werte entsprechend dabei einer stärkeren Bestrafung im Überlastbereich. Beispiele für Funktionsverläufe der BPR-Funktion für verschiedene Parameter sind in Abbildung 5 dargestellt.

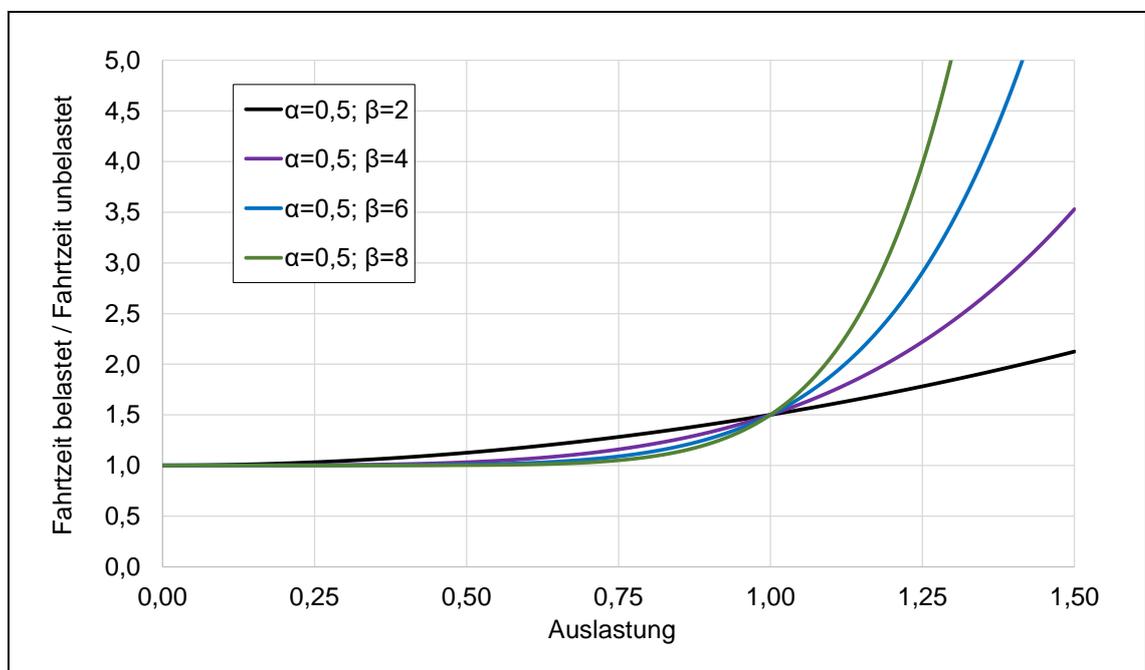


Abbildung 5: Kapazitätsbeschränkungsfunktionen des Typs BPR.

Durch den parabolischen Funktionsverlauf werden im Überlastbereich sehr hohe Fahrzeiten ausgegeben. SPIESS (1990) und LOHSE UND SCHNABEL (2011b) merken dies

kritisch an und stellen neue Funktionen vor. SPIESS (1990) entwickelt die sogenannten Conical-Funktionen und LOHSE UND SCHNABEL (2011b) stellen die Lohse-Funktion vor. Beide Funktionsgruppen teilen die Eigenschaft, im Überlastbereich einen linearen Verlauf anzunehmen. Dies soll die Fahrtzeiten im Überlastfall realistischer abbilden und sich ebenfalls positiv auf die Konvergenzeigenschaften der Umlegungsverfahren auswirken. Beispielhafte Verläufe für Lohse-Funktionen sind in Abbildung 6 zu sehen. Formel (6) zeigt die zugehörige, zweigeteilte Berechnungsvorschrift nach LOHSE UND SCHNABEL (2011b). An einer vorzugebenden kritischen Auslastung gehen exponentieller und linearer Kurvenverlauf ineinander über.

$$f^{Lohse} = \begin{cases} t_s^0 \cdot (1 + \alpha \cdot (x_s)^\beta) & , x_s \leq x_s^{crit} \\ t_s^0 \cdot (1 + \alpha \cdot (x_s^{crit})^\beta) + \alpha \cdot \beta \cdot t_s^0 \cdot (x_s^{crit})^{\beta-1} \cdot (x_s - x_s^{crit}) & , x_s > x_s^{crit} \end{cases} \quad (6)$$

mit

f^{Lohse} Lohse-Funktion mit Funktionsparametern α , β und x_s^{crit}

x_s^{crit} Kritische Auslastung auf Netzelement s

Es gibt zahlreiche weitere CR-Funktionstypen. Eine Kategorisierung und die Vorstellung einer Auswahl an Funktionen ist in NEUHOLD (2018) zu finden.

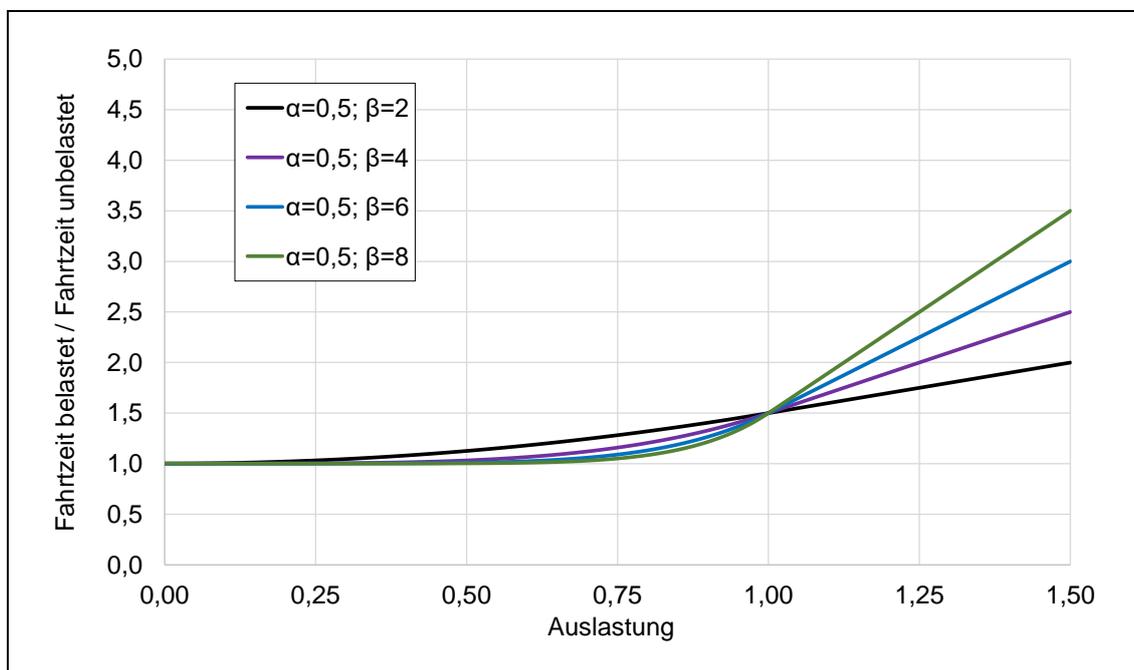


Abbildung 6: Kapazitätsbeschränkungsfunktionen des Typs Lohse für eine kritische Auslastung von $x_s^{crit} = 1$.

2.3 Verkehrsplanungsmodelle

Verkehrsmodelle, die in der Verkehrsplanung eingesetzt werden, werden Verkehrsplanungsmodelle genannt. Diese geben die Realität in Bezug auf Verkehr abstrahiert wieder und können dazu verwendet werden, Wirkungen von Maßnahmen (z. B. Neubau eines Radweges, Einführung einer City-Maut, Erlass eines Lkw-Durchfahrtsverbots) oder Entwicklungen (z. B. Zunahme der Einwohnerzahl, demografischer Wandel, Kraftstoffpreisänderungen) zu prognostizieren.

Abbildung 7 zeigt, aus welchen Bestandteilen Verkehrsplanungsmodelle bestehen können. Die Basis bilden Datenmodelle, die Informationen zu drei Bereichen liefern:

- **Mobilitätsverhalten:**
Es handelt sich um durch Erhebungen und Befragungen erfasste Daten, die das Mobilitätsverhalten der Bevölkerung beschreiben. Dies beinhaltet die Nutzung von Verkehrsmitteln, welchen Aktivitäten in welcher Häufigkeit nachgegangen wird und Verteilungen zu Reiseweiten und -zeiten.
- **Verkehrsangebot:**
Das Datenmodell Verkehrsangebot umfasst eine Repräsentation der Infrastruktur für Individualverkehr und Öffentlichen Verkehr (ÖV) und ihrer relevanten Eigenschaften. Kapitel 2.3.1 enthält detailliertere Ausführungen hierzu.
- **Siedlungsstruktur:**
Das Datenmodell Siedlungsstruktur gibt die räumliche Verteilung der Bevölkerung und Nutzungen an. Dazu gehören u. a. die Zahl der Wohnungen, Arbeitsplätze, Schulplätze, Einkaufsmöglichkeiten und Freizeitstätten. Diese Daten können gebäudefein oder aggregiert auf Ebene von Verkehrszellen vorliegen.

Diese Daten fließen in die beiden Wirkungsmodelle Ortsveränderungen und Verkehrsauswirkungen ein. Ersteres bildet die auf den Verkehr bezogenen Entscheidungen von Personen oder -gruppen nach und wird auch Verkehrsnachfragemodell genannt. Die Verkehrsnachfragemodellierung wird in Kapitel 2.3.2 ausführlicher vorgestellt. Das Wirkungsmodell Verkehrsauswirkungen steht stellvertretend für Methoden, die indirekte Auswirkungen von Ortsveränderungen wie z. B. Luftschadstoffemissionen zu quantifizieren versuchen.

Die Ergebnisse der Wirkungsmodelle gehen in Bewertungsmodelle ein, die diese aus verschiedenen Perspektiven beurteilen. In Abhängigkeit der Zielsetzung kann es erforderlich sein, Teile im Ablauf eines Verkehrsplanungsmodells anzupassen. Optimierungsmodelle können eingesetzt werden, um einen gewünschten Zielzustand zu erreichen bzw. eine möglichst optimale Lösung zu einer Fragestellung zu finden.

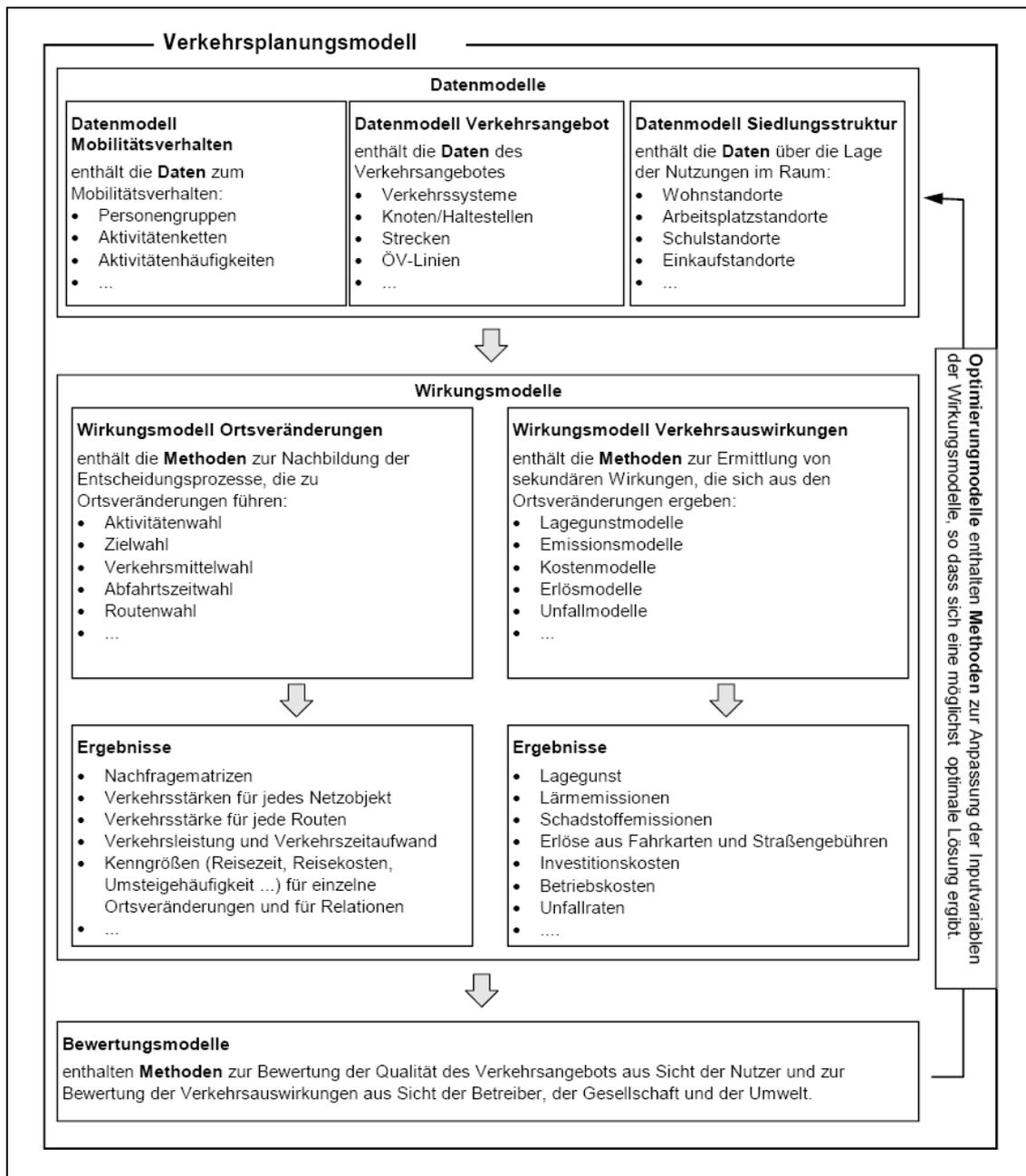


Abbildung 7: Bestandteile eines Verkehrsplanungsmodells (FRIEDRICH (2020)).

2.3.1 Verkehrsangebotsmodellierung

Das Datenmodell Verkehrsangebot, auch Netzmodell genannt, soll die Struktur des Verkehrsnetzes vereinfacht darstellen und seine relevanten Eigenschaften über eine geeignete Attribuierung beinhalten. Dieses Kapitel soll einen Überblick zur makroskopischen Modellierung des Verkehrsangebots geben. Der Fokus soll dabei auf den Inhalten liegen, die für den Individualverkehr von Bedeutung sind. Die Begriffe und Beschreibungen in diesem Kapitel orientieren sich am Aufbau des Netzmodells in der Verkehrsplanungsoftware VISUM der PTV Group (PTV (2020)). Die PTV Group ist ein Unternehmen,

dass Modellierungs- und Simulationssoftware für Verkehr, Mobilität und Logistik entwickelt und vertreibt.

Um die Infrastruktur des Verkehrsnetzes im Modell abzubilden, werden Netzobjekte verwendet. Die Basis bilden Knoten und Strecken. Knoten bilden Kreuzungen aller Art ab oder stehen für spezifische Punkte, die für den Öffentlichen Verkehr relevant sind, wie z. B. Haltepunkte.

Strecken werden stets zwei Knoten zugeordnet. Sämtliche Strecken sind gerichtet, haben also einen Anfangs- und einen Endknoten. Hin- und Rückrichtung einer Strecke sind somit unterscheidbar. Strecken repräsentieren Straßen, Schienenwege oder sonstige Wege. Wichtige Eigenschaften von Strecken sind:

- Länge,
- Streckentyp,
- Zulässige Verkehrssysteme,
- Geschwindigkeitslimit für den Individualverkehr,
- Kapazität für den IV in Pkw-Einheiten.

Streckentypen sind eine Möglichkeit, Strecken zu gruppieren und diesen die gleichen Eigenschaften in Form von Attributwerten zu vererben.

Verkehrssysteme werden bezüglich ihres Namens und der Betriebsform (IV oder ÖV) unterschieden. Der Name gibt typischerweise an, um welches Verkehrsmittel (Pkw, Fuß, Rad, Bus, etc.) es sich handelt. Für Verkehrssysteme des IV muss hinterlegt werden, mit welchem Faktor die Fahrzeuge in Pkw-Einheiten umgerechnet werden sollen und wie hoch die Maximalgeschwindigkeit für bestimmte Streckentypen ist. Beide Angaben sind für die Berechnung der Fahrtzeiten relevant. Für ÖV-Verkehrssysteme gibt der Fahrplan diese Zeiten vor.

Verkehrsmodi sind die Schnittstelle zwischen Verkehrsangebot und -nachfrage. Ein Modus umfasst ein oder mehrere Verkehrssysteme und kann von einem oder mehreren Nachfragesegmenten genutzt werden. Beispiele für Modi sind Pkw-Fahrer, Pkw-Mitfahrer, Rad, Fuß und ÖV. Der Modus ÖV kann alle ÖV-Verkehrssysteme einschließen. Es ist aber auch eine Unterteilung in ÖV-Nahverkehr und ÖV-Fernverkehr mit entsprechender Zuordnung der Verkehrssysteme (Stadtbahn vs. Fernbahn) denkbar.

Die Einteilung in Nachfragesegmente ermöglicht das Hinterlegen und Berechnen nachfragesegment-spezifischer Matrizen sowie eine separate Auswertung. Differenziert werden können Nachfragesegmente u. a. anhand von Personengruppen, ÖV-Fahrkartenarten, Fahrtzwecken oder der räumlichen Verteilung der Nachfrage. So könnte man ein Nachfragesegment für als konstant vorgegebene Pkw-Fahrtenmatrix für den Fernverkehr, der das Untersuchungsgebiet kreuzt, anlegen. Ein weiteres Nachfragesegment wird dann für die Nachfrage der Pkw-Fahrten vorgesehen, die man im Verkehrsnachfragemodell berechnet. Sämtliche Pkw-Fahrten im Modell werden dann über diese beiden Nachfragesegmente abgebildet.

Ob und wie an einem Knoten abgebogen werden darf, wird über Abbieger festgelegt. Diese geben vor, welche Verkehrssysteme mit welchen Zeitzuschlägen aus welcher Richtung in eine andere fahren dürfen. Auch für Abbieger können Kapazitäten vorgegeben werden.

Haltestellen umfassen üblicherweise mehrere Haltepunkte, die als besondere Knoten oder auf Strecken liegend modelliert werden können. ÖV-Linien verlaufen räumlich auf Strecken über Knoten und beginnen und enden an Haltepunkten. Für Linien muss ein ÖV-Verkehrssystem vorgegeben und ein Fahrplan hinterlegt sein.

Verkehrszellen, in VISUM Bezirke genannt, sind Netzobjekte, über die die Verkehrsnachfrage in Form von Fahrten in das Verkehrsnetz eingeht und über die sie auch wieder das Netz verlässt. Die Anzahl an Zellen beeinflusst also direkt die Dimension der Matrizen im Verkehrsmodell. Informationen zur Siedlungsstruktur werden auf Ebene der Verkehrszellen hinterlegt. Sie bestehen stets aus einem Schwerpunkt und optional auch aus einer Fläche, die sie repräsentieren sollen. Die Einteilung und Größe von Verkehrszellen können sich beispielsweise an der Bebauung (Gebäude, Gebäudeblöcke) oder an amtlich festgelegten Gebieten (Gemeinden, Stadtteile, Postleitzahlgebiete) orientieren. Eine genauere Einteilung erfordert entsprechend auch die Kenntnis über die siedlungsstrukturellen Größen in den jeweiligen Zellen, ermöglicht aber auch eine detailliertere Modellierung und Auswertung.

Die Verbindung zwischen Bezirken und dem Netz aus Knoten und Strecken wird über Anbindungen realisiert. Anbindungen verlaufen stets zwischen einem Bezirksschwerpunkt und einem Knoten. Sie repräsentieren den Zugangs- oder Abgangsweg für Fahrten mit dem IV oder ÖV. Wie Strecken sind auch Anbindungen gerichtet und als Quell- oder Zielanbindung zu identifizieren. Zu ihren Eigenschaften gehört neben der Länge auch die Zeit, welche bereits Wartezeiten für den ÖV oder Parksuchzeiten enthalten können.

Eine vereinfachte Darstellung eines Netzmodells ist in Abbildung 8 zu sehen. In der vergrößerten Ansicht eines Knotens ist eine Auswahl der Abbieger für diesen Knotenpunkt abgebildet. Von der Strecke im Süden kommend gibt es in diesem Beispiel vier mögliche Abbieger: Rechtsabbieger, Geradeausfahrer, U-Turn und Linksabbieger.

Zur Verkehrsangebotsmodellierung gehört auch, dass Kosten für die Nutzung von Verkehrsmitteln hinterlegt werden. Für den MIV kann dies beispielsweise fahrtweitenabhängig erfolgen, für den ÖV lassen sich Tarifsysteme einbinden.

Aus dem Netzmodell lassen sich schlussendlich Eigenschaften des Verkehrsangebots ableiten, die maßgeblich für Entscheidungen von Verkehrsteilnehmern sind. Messbare Eigenschaften von Ortsveränderungen in Abhängigkeit des Verkehrsmittels und der Route sind die Reisezeit oder Kosten. Solche Größen werden auch Kenngrößen genannt. Zur Ermittlung der Reisezeiten sei auf Kapitel 2.2 verwiesen. Das Verbinden und Gewichten von Kenngrößen erfolgt mit Nutzenfunktionen. In diesen Funktionen wird der Einfluss von Kenngrößen auf den Nutzen einer Alternative abgebildet. Statt des Nutzens

von Alternativen findet man in der Literatur, insbesondere in Bezug auf Routen, auch häufig die Bezeichnung Widerstand, welcher dann dem negierten Nutzen entspricht.

Die Bewertung von Widerständen und das Abbilden der Entscheidung ist Gegenstand der Nachfragemodellierung, die hierzu Entscheidungsmodelle nutzt. Das Verkehrsangebot stellt die Grundlage dafür in Form von Kenngrößen bereit.

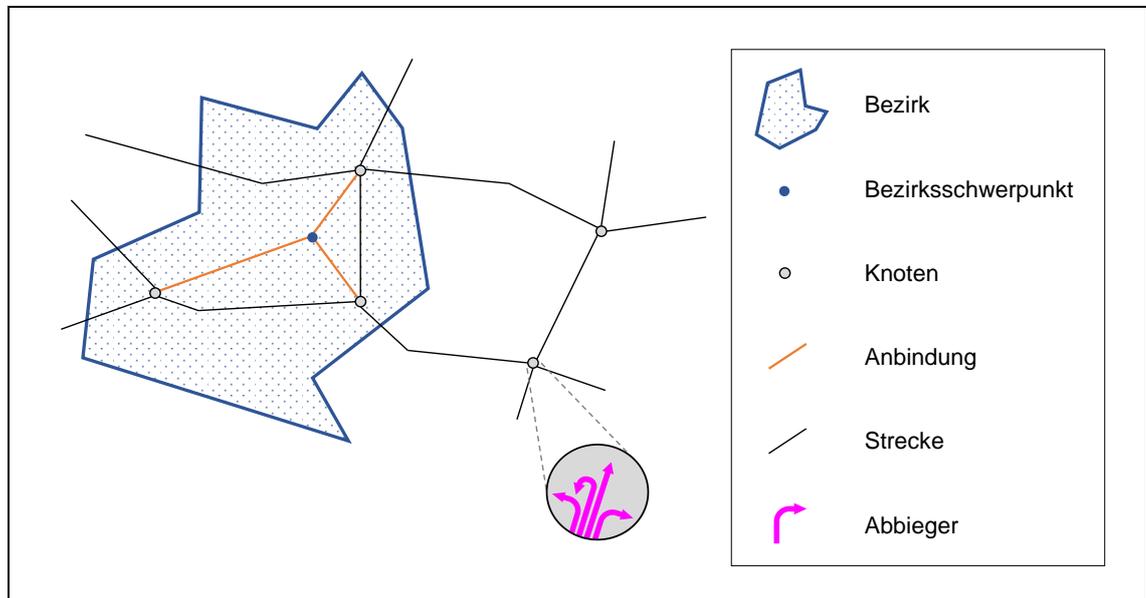


Abbildung 8: Vereinfachtes Netzmodell.

2.3.2 Verkehrsnachfragemodellierung

Im Folgenden soll ein Überblick über die Grundlagen der makroskopischen Verkehrsnachfragemodellierung gegeben werden.

Makroskopische Verkehrsnachfragemodelle fassen Personen zu verhaltenshomogenen Nachfragegruppen zusammen und berechnen die Verkehrsnachfrage auf Ebene von Relationen zwischen Verkehrszellen. Die Menge an Ortsveränderungen für Relationen und die Verkehrsstärke auf Routen hängen dabei von Wahrscheinlichkeiten ab, mit denen die entsprechenden Alternativen (Zielverkehrszelle, Route) gewählt werden. Durch das Arbeiten mit Wahrscheinlichkeiten ohne die explizite Modellierung einzelner Fahrzeuge oder Personen treten zum einen nichtganzzahlige Verkehrsstärken auf und zum anderen liegen dieselben Kenngrößen (z. B. Reisezeiten) und Parameter (z. B. zur Zeitwahrnehmung) für die Entscheidung aller Personen einer Nachfragegruppe zugrunde. (FRIEDRICH ET AL. (2019a))

Abbilden von Aktivitätenketten

Für makroskopische Verkehrsnachfragemodelle können zwei Ansätze zur Abbildung von Aktivitätenketten unterschieden werden: aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle und aktivitätenbasierte Wegekettensmodelle.

Erstgenannte betrachten dabei stets nur einzelne Wege als Teile einer Aktivitätenkette. Der Kontext innerhalb der Aktivitätenkette wird dabei vernachlässigt. Jeder Einzelweg findet zwischen zwei Verkehrszellen statt und weist für Quelle und Ziel jeweils eine Aktivität aus, z. B. Wohnen – Arbeiten. Die isolierte Betrachtung einzelner Wege kann zur Folge haben, dass aufgrund von unterschiedlichen Angebotsqualitäten für Hin- und Rückrichtung einer Aktivitätenkette (z. B. Wohnen – Arbeiten und Arbeiten – Wohnen innerhalb der Kette Wohnen – Arbeiten – Wohnen) die Ergebnisse der Moduswahl für die Richtungen nicht übereinstimmen. Diese Modelltheorie wird auch wegebasiertes Einzelwegmodell genannt. (FRIEDRICH ET AL. (2019a))

Aktivitätenbasierte Wegekettensmodelle, die auch als Aktivitätenkettenmodelle bezeichnet werden, berücksichtigen von Start in der Wohnung bis zur Rückkehr sämtliche Aktivitäten und bilden Ziel- und Moduswahl im Kontext der ganzen Aktivitätenkette nach. Dadurch kann sichergestellt werden, dass es zu keinen Widersprüchen oder unrealistischen Situationen bei der Moduswahl für Hin- und Rückrichtung kommt, wie z. B. Wohnen – Arbeiten mit ÖV, Arbeiten – Wohnen als Pkw-Fahrer. (FRIEDRICH ET AL. (2019a))

Vier-Stufen-Modell

Verkehrsnachfragemodelle sollen verkehrsrelevante Entscheidungen von Verkehrsteilnehmern nachbilden. Das Vier-Stufen-Modell, dessen Ursprung bis in die 50er Jahre zurückgeht (BATES (2007)), bildet diesen Entscheidungsprozess in vier sequentiell ablaufenden Modellstufen nach:

1. Verkehrserzeugung,
2. Verkehrszielwahl,
3. Verkehrsmoduswahl,
4. Routenwahl.

Zunächst sollen die einzelnen Modellstufen kurz erläutert werden. Die Beschreibungen beziehen sich dabei auf aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle. Danach wird auf Varianten des Vier-Stufen-Modells und Abwandlungen der Modellstufen von Verkehrsnachfragemodellen eingegangen.

Verkehrserzeugung

Erzeugungsmodelle bestimmen die Zahl der Ortsveränderungen der Personen im Modell in einem Zeitraum. Die Motivation für eine Ortsveränderung ist durch das Bedürfnis nach einer Aktivität begründet. Die Verkehrserzeugung wird daher auch als Aktivitätenwahl bezeichnet. Ihr Ergebnis ist die potentielle Menge an produzierten und angezogenen Wegen jeder Nachfragegruppe für jede Verkehrszelle.

Input für die Verkehrserzeugung sind Daten der Siedlungsstruktur und des Mobilitätsverhaltens. Die Nachfrage ist in verhaltenshomogene Nachfragegruppen unterteilt. Eine Nachfragegruppe repräsentiert eine Personengruppe, die an einen Wegezweck (Arbeiten), ein Aktivitätenpaar (Wohnen – Arbeiten) oder eine Aktivitätenkette (Wohnen – Arbeiten – Einkaufen – Wohnen) gekoppelt ist (FRIEDRICH ET AL. (2019a)). Wegezwecke sind von den Strukturgrößen abhängig, z. B. Wegezweck Arbeiten von Strukturgröße Arbeitsplätzen und Wegezweck Einkaufen von Strukturgröße Einkaufsmöglichkeiten.

Die Zahl der Ortsveränderungen wird aus zwei Perspektiven betrachtet und berechnet. Für jede Verkehrszelle werden die produzierten und angezogenen Wege ermittelt. Formel (7) und (8) zeigen die allgemeine Berechnungsvorschrift dafür (FRIEDRICH (2020)).

$$d_{go}^p = \sum_{k \in K} \beta_{gk}^p \cdot z_{ko} \quad (7)$$

$$d_{gd}^a = \sum_{k \in K} \beta_{gk}^a \cdot z_{kd} \quad (8)$$

mit

d_{go}^p produzierte Wege d der Nachfragegruppe g in der Verkehrszelle o

d_{gd}^a angezogene Wege d der Nachfragegruppe g in der Verkehrszelle d

K Menge Strukturgrößen

$\beta_{gk}^p, \beta_{gk}^a$ Produktions- bzw. Attraktionsrate für g und Strukturgröße k

z_{ko}, z_{kd} Wert für Strukturgröße k in Verkehrszelle o bzw. d

Verkehrszielwahl

Bei der Zielwahl werden produzierte und angezogene Verkehrsaufkommen aufeinander verteilt. Die Modellstufe wird deshalb auch Verkehrsverteilung genannt. Ihr Ergebnis ist eine Nachfragematrix für jede Nachfragegruppe.

Um die Ortsveränderungen zwischen zwei Zellen o und d zu bestimmen, fließt neben dem produzierten Verkehrsaufkommen der Zelle o und dem angezogenen Verkehrsaufkommen von d auch noch der Aufwand für das Erreichen der Zelle d von o aus, und wie dieser von den Nachfragegruppen bewertet wird, mit ein. Synonym verwendete Begriffe, um den Aufwand zu beschreiben, sind Nutzen oder Widerstand. Der Aufwand setzt sich nach Formel (9) aus Kenngrößen des Verkehrsangebots (z. B. Kosten, Reisezeit, Reiseweite) und zugehörigen Parametern zusammen. Formel (10) zeigt, dass er über eine Bewertungsfunktion in die Berechnung der Ortsveränderungen eingeht. Beispiele für Bewertungsfunktionen sind Potenz- oder Exponentialfunktionen.

In der Verkehrsverteilung besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Zielwahl und dem Aufwand, der für die Erreichbarkeit eines räumlichen Ziels von einem bestimmten Ausgangspunkt steht. Daraus folgt bei der Berechnung der Verkehrsströme, dass eine Zelle umso mehr Verkehr und Verkehr von umso weiter entfernten Zellen anzieht, je

geringer der Aufwand zwischen diesen Zellen ist. Dieser Zusammenhang bedeutet beispielsweise, dass kürzere Fahrtzeiten zusätzlichen Verkehr zur Folge haben, da damit eine Verbesserung der Erreichbarkeit einhergeht.

Bei der Verkehrszielwahl ist zu beachten, dass in Abhängigkeit des Wegezwecks gewisse Bedingungen, sogenannte Randsummenbedingungen, eingehalten werden müssen. Eine harte Randsummenbedingung kann ausdrücken, dass nicht mehr Personen eine Zelle als Ziel für die Aktivität Arbeiten auswählen können, als es Arbeitsplätze in dieser Zelle gibt. Für bestimmte andere Aktivitäten werden häufig weiche Randsummenbedingungen in Form von Ober- oder Untergrenzen für die tatsächlich angezogenen Wege vorgegeben. Ein Beispiel hierfür wäre, dass auch bei schlechterer Erreichbarkeit Krankenhäuser eine Mindestmenge an Verkehrsaufkommen anziehen. Die Obergrenze entspricht dann wiederum der Kapazität der Einrichtung. Bei offenen Randsummenbedingungen gibt es keinerlei Ober- und Untergrenzen für das Verkehrsaufkommen. Diese können für Freizeitaktivitäten ohne Platzbeschränkungen angenommen werden. Die Anzahl der Wege ergibt sich hauptsächlich aus der Erreichbarkeit. (FRIEDRICH ET AL. (2019a))

Formel (10) beschreibt ein Zielwahlmodell mit Randsummenbedingungen. Die Berechnung erfolgt iterativ mit beispielsweise dem Multi-Verfahren (LOHSE UND SCHNABEL (2011b)), bis Anpassungsfaktoren gefunden sind, die die Bedingungen einhalten.

$$v_{god} = \sum_{k \in K} \beta_{gk}^d \cdot x_{kod} \quad (9)$$

$$d_{god} = f(v_{god}) \cdot f_{d_{go}}^p \cdot f_{d_{gd}}^a \quad (10)$$

mit

v_{god}	Nutzen der Ortsveränderung für g von Zelle o nach d
β_{gk}^d	Parameter für die Aufwandsempfindlichkeit von g gegenüber der Kenngröße k bei der Zielwahl
x_{kod}	Wert der Kenngröße k für Relation von o nach d
d_{god}	Ortsveränderungen von g auf der Relation von o nach d
$f(v_{god})$	Bewertungsfunktion für den Nutzen
$f_{d_{go}}^p, f_{d_{gd}}^a$	Anpassungsfaktoren für quell- bzw. zielseitiges Verkehrsaufkommen

Es gibt auch Zielwahlmodelle, bei denen die Anzahl der Ortsveränderungen einseitig auf Seite des Quellverkehrs, des Zielverkehrs oder bezüglich der Wegezwecke festgelegt wird (FRIEDRICH ET AL. (2019a)). Dann kann die Verkehrsverteilung direkt und ohne iteratives Lösungsverfahren berechnet werden. Formel (11) zeigt die allgemeine Berechnungsvorschrift für eine quellseitig gekoppelte Zielwahl.

$$d_{god} = d_{go}^p \cdot \frac{d_{gd}^a \cdot f(v_{god})}{\sum_{d \in Z} d_{gd}^a \cdot f(v_{god})} \quad (11)$$

mit

d_{go}^p	produzierte Wege d der Nachfragegruppe g in der Verkehrszelle o
d_{gd}^a	angezogene Wege d der Nachfragegruppe g in der Verkehrszelle d
Z	Menge Verkehrszellen

Verkehrsmoduswahl

Die Menge der Ortsveränderungen jeder Nachfragegruppe wird in der Moduswahl auf die Verkehrsmodi aufgeteilt. Daher wird diese Modellstufe auch Verkehrsaufteilung genannt. Das Ergebnis ist eine Nachfragematrix je Nachfragegruppe und Modus. Beinhaltet ein Modus mehrere Verkehrsmittel (z. B. Modus ÖV mit Verkehrsmitteln Bus und Bahn) wird eine zweite Wahl notwendig, welche meistens im Rahmen der Routenwahl durchgeführt wird (FRIEDRICH ET AL. (2019a)).

ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011) teilen die Einflussfaktoren für die Moduswahl in drei Kategorien ein, für die jeweils im Folgenden eine Auswahl aufgelistet wird.

- Eigenschaften des Verkehrsteilnehmers:
 - Verfügbarkeit eines Mobilitätswerkzeugs (z. B. Pkw, ÖV-Zeitkarte),
 - Pkw-Fahrerlaubnisbesitz,
 - Einkommen,
 - Haushaltsstruktur.
- Eigenschaften der Ortsveränderung:
 - Wegezweck,
 - Zeitpunkt der Ortsveränderung.
- Eigenschaften des Modus:
 - Zeitaufwand (Unterscheidung in u. a. Fahrtzeit, Zu- und Abgangszeit, Wartezeit),
 - Reisekosten,
 - Regelmäßigkeit und Zuverlässigkeit,
 - Komfort.

Die wichtigsten Einflussfaktoren sollten in der Moduswahl berücksichtigt werden. Einige werden auf Grundlage der Personen- bzw. Nachfragegruppen integriert, andere fließen direkt als Kenngröße ein. Wie auch für die Zielwahl werden die Einflussgrößen in einer Funktion mit Parametern gewichtet und so der Nutzen für eine Ortsveränderung einer Nachfragegruppe für eine Relation und einem Modus ermittelt (siehe Formel (12)). Die Verkehrsverteilung wird dann mithilfe des bewerteten Nutzens für alle Modi nach Formel (13) berechnet. (FRIEDRICH ET AL. (2019a))

$$v_{godm} = \beta_{g0m}^m + \sum_{k \in K} \beta_{gkm}^m \cdot x_{kodem} \quad (12)$$

$$d_{godm} = d_{god} \cdot \frac{f(v_{godm})}{\sum_{m \in M} f(v_{godm})} \quad (13)$$

mit

v_{godm}	Nutzen der Ortsveränderung für g von Zelle o nach d mit Modus m
β_{g0m}^m	modusspezifische Nutzenkonstante
β_{gkm}^m	Parameter für die Aufwandsempfindlichkeit von g gegenüber der Kenngröße k mit dem Modus m
x_{kodem}	Wert der Kenngröße k für Relation von o nach d mit Modus m
d_{godm}	Ortsveränderungen von g auf der Relation von o nach d mit m
d_{god}	Ortsveränderungen von g auf der Relation von o nach d
$f(v_{godm})$	Bewertungsfunktion für den Nutzen
M	Menge Verkehrsmodi

Routenwahl

Die in den vorigen Modellstufen ermittelte Verkehrsnachfrage wird durch die Wahl von Routen oder Verbindungen auf das Netzmodell umgelegt. Dieser Prozess wird auch Verkehrsumlegung genannt. Eine Verbindung ist eine Route mit bekannter Abfahrtszeit. Ist die Zeitabhängigkeit der Verkehrsangebotsqualität im betrachteten Modellzeitraum relevant, kann die Routenwahl um eine Abfahrtszeitwahl ergänzt werden. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn für den ÖV ein Fahrplan hinterlegt ist. Das Resultat der Verkehrsumlegung sind Belastungen auf Ebene von Routen bzw. Verbindungen und einzelnen Netzelementen wie beispielsweise Strecken oder Abbieger.

Die Verkehrsstärke auf einem Netzelement ergibt sich aus der Summe der Verkehrsstärken aller Routen bzw. Verbindungen, die über dieses Netzelement führen und berechnet sich somit nach Formel (14) (angelehnt an FRIEDRICH ET AL. (2019a)).

Wird im Modell angenommen, dass Fahrtzeiten auslastungsabhängig sind, so werden diese innerhalb der Umlegung in Abhängigkeit der Verkehrsstärken und Kapazitäten aktualisiert.

Verkehrsumlegungen für den IV kommt im Rahmen dieser Arbeit eine größere Bedeutung zu, weswegen die Thematik in Kapitel 2.3.3 genauer behandelt wird. Auf eine Vorstellung von Umlegungsmodellen für den ÖV wird an dieser Stelle aufgrund ihrer für die Arbeit untergeordneten Relevanz verzichtet und auf CASCETTA (2009) und FRIEDRICH ET AL. (2019a) verwiesen.

$$q_s = \sum_{g \in G} \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} \sum_{m \in M} \sum_{s \in R} d_{godmr} \quad (14)$$

mit

q_s	Verkehrsstärke auf Netzelement s
d_{godmr}	Ortsveränderungen von Nachfragegruppe g auf der Relation von Zelle o nach Zelle d mit Modus m auf Route r
G	Menge Nachfragegruppen
Z	Menge Verkehrszellen
M	Menge Verkehrsmodi
R	Menge Routen

Rückkopplung

Der sequentielle Ablauf der vier Modellstufen hat zur Folge, dass bei der Ziel- und Moduswahl die sich durch die Routenwahl ergebenden Reisezeiten noch gar nicht berücksichtigt werden. Daher wird die Angebotsqualität als Ergebnis der Routenwahl in die Ziel- und Moduswahl zurückgeführt, was als Rückkopplung bezeichnet werden kann. Die Modellstufen müssen dann iterativ mehrfach durchlaufen werden, bis es zu einem Gleichgewicht kommt, d. h. sich keine Änderungen relevanten Ausmaßes mehr bezüglich Nachfragestruktur und Angebotsqualität ergeben. Zur Identifikation eines Gleichgewichtszustandes müssen Konvergenzmaße vorgegeben werden. (FRIEDRICH ET AL. (2019a))

Abbildung 9 zeigt den Ablauf der Verkehrsnachfrageberechnung für ein Vier-Stufen-Modell, dass die Rückkopplung der Angebotsqualität integriert. Ferner wird auch ersichtlich, in welche Modellstufe Einflussgrößen aus den Datenmodellen, die in der Übersicht zu Verkehrsplanungsmodellen in Abbildung 7 gezeigt werden, eingehen. Makroskopische Nachfragemodelle, die eine Rückkopplung in den Berechnungsablauf integrieren, sind in der Lage, eine eindeutige und reproduzierbare Lösung zu finden.

Zusammenfassung von Modellstufen

Es gibt auch Ansätze, die Modellstufen zusammenfassen, statt diese sequentiell durchzuführen. Diese nehmen an, dass die Entscheidungen in den einzelnen Modellstufen nicht unabhängig voneinander sind. Es gilt dann, dass alle Einflussgrößen der Teilentscheidungen eingehen. (FRIEDRICH ET AL. (2019a))

- **Verkehrserzeugung und Moduswahl:**
Mit der Annahme, dass die Moduswahl hauptsächlich von Eigenschaften der Nachfragegruppe wie z. B. Pkw-Verfügbarkeit abhängt, lässt sich unter Berücksichtigung der Erreichbarkeit von Verkehrszellen für jeden Modus die Moduswahl in die Verkehrserzeugung integrieren.

- Ziel- und Moduswahl:

Es wird unterstellt, dass die Zielwahl von verfügbaren Verkehrsmodi abhängt bzw. dadurch eingeschränkt wird. Ohne einen verfügbaren Pkw werden keine Ziele gewählt, die nur mit Pkw (gut) zu erreichen sind. Nachfolgend wird ein Ansatz, der Ziel- und Moduswahl simultan berechnet, vorgestellt.

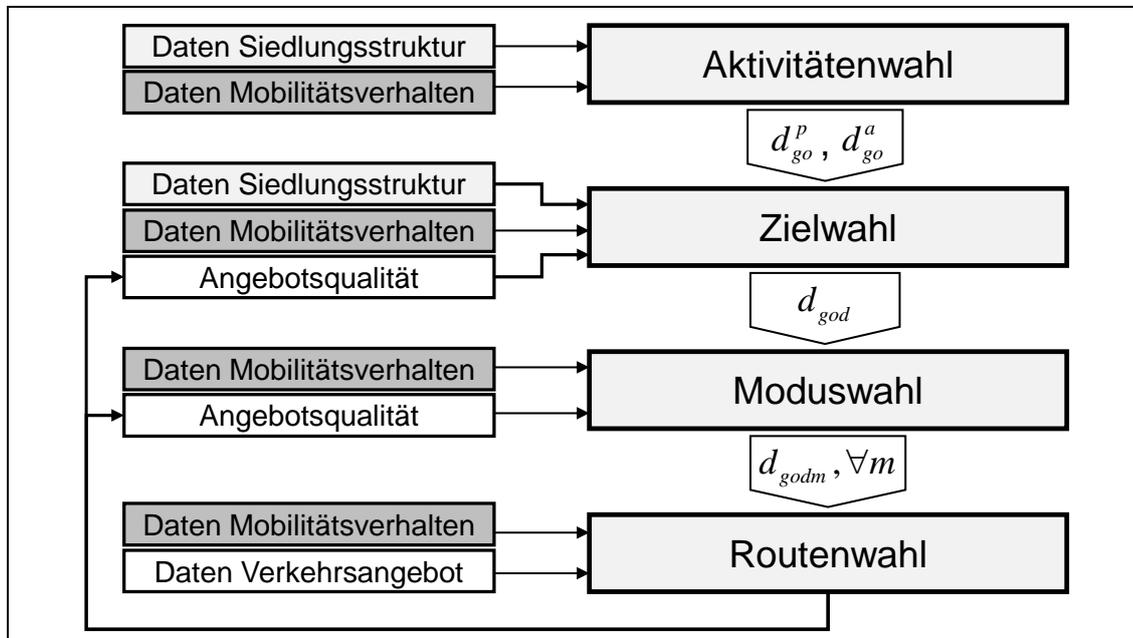


Abbildung 9: Ablauf der Modellstufen im Vier-Stufen Modell mit Rückkopplung (eigene Darstellung in Anlehnung an FRIEDRICH (2020)).

Verkehrsnachfragemodellierung mit VISEM

VISEM (Verkehr-In-Städten-Erzeugungs-Modell) ist ein Verkehrsnachfragemodell in der Software VISUM, das aktivitätenbasierte Wegeketten nachbildet. VISEM inkludiert die drei Modellstufen Verkehrserzeugung, Ziel- und Moduswahl, wobei letztere beide in einem Schritt kombiniert berechnet werden. (PTV (2020))

Für die Verkehrserzeugung muss für jede Nachfragegruppe die Wahrscheinlichkeit zur Ausübung einer Aktivitätenkette gegeben sein. Diese lassen sich aus Mobilitätserhebungen ableiten. Aus der Multiplikation der Anzahl der Personen einer Nachfragegruppe mit der Wahrscheinlichkeit pro Aktivitätenkette ergibt sich die Anzahl der erzeugten Wegeketten. Jedes Aktivitätenpaar in der Wegekette wird dann gleich oft bzw. von gleich vielen Personen nacheinander durchgeführt.

Beispiel: Die Nachfragegruppe Studierende besteht aus 1.000 Personen und führt zu 40 % die Aktivitätenkette Wohnen – Bildung – Wohnen aus. Also werden 400 Studierende Ortsveränderungen für die beiden Aktivitätenpaare Wohnen – Bildung und Bildung – Wohnen vornehmen. Es werden für diese Kombination aus Nachfragegruppe und Aktivitätenkette 800 Wege erzeugt.

Da die Entscheidungen über die Wahl des Ziels und des Modus als abhängig voneinander angenommen werden, wird die Ziel- und Moduswahl hierarchisch simultan berechnet. Die Zielwahl hängt dabei auch von der modusübergreifenden Erreichbarkeit einer Verkehrszelle im Vergleich zu der Erreichbarkeit anderer Zellen ab. Diese modusübergreifende Erreichbarkeit einer Verkehrszelle wird über die Log-Summe der bewerteten, modusspezifischen Nutzenwerte abgebildet.

Mit den aus den zuvor erläuterten Modellstufen bekannten Größen ergibt sich die Berechnung der kombinierten Ziel- und Moduswahl nach den Formeln (15) bis (18) (verallgemeinert aus FRIEDRICH ET AL. (2019a)). Formel (17) ist eine Abwandlung aus Formel (10). Die Bewertung der erwähnten Log-Summe aus Formel (18) beeinflusst die Berechnung des Zielverkehrsaufkommens in Formel (17). Mit Formel (16) wird bestimmt, wie sich das Zielverkehrsaufkommen auf die verfügbaren Modi aufteilt.

$$d_{godm} = p_{godm} \cdot d_{god} \tag{15}$$

$$p_{godm} = \frac{f(v_{godm})}{\sum_{m \in M} f(v_{godm})} \tag{16}$$

$$d_{god} = d_{go}^p \cdot \frac{d_{gd}^a \cdot f(x_{god})}{\sum_{d \in Z} d_{gd}^a \cdot f(x_{god})} \tag{17}$$

$$x_{god} = \ln \sum_{m \in M} f(v_{godm}) \tag{18}$$

mit

p_{godm}	Wahrscheinlichkeit für Nachfragegruppe g auf der Relation von Zelle o nach Zelle d den Modus m zu wählen
x_{god}	Log-Summe der bewerteten Nutzen aller Modi für Ortsveränderung von Nachfragegruppe g auf der Relation von Zelle o nach Zelle d

2.3.3 Verkehrsumlegung für den Individualverkehr

Verkehrsumlegungsmodelle bilden die Routenwahl der Verkehrsteilnehmer in einem Verkehrsnetzmodell nach. In diesem Kapitel wird eine Übersicht über den Ablauf gegeben, gängige Routenwahlmodelle kurz vorgestellt und auf zugehörige Lösungsverfahren eingegangen.

Ablauf

Der grundsätzliche Ablauf einer Umlegung unterscheidet sich je nachdem, ob eine elastische oder unelastische Nachfrage zugrunde liegt (CASSETTA (2001)). Da diese Arbeit vom klassischen Vier-Stufen-Algorithmus als Verfahren für Verkehrsnachfragemodelle

ausgeht, liegt der Fokus auf dem Fall unelastischer Nachfrage. Das bedeutet, dass innerhalb der Umlegung die Nachfrage fix bleibt und es keine Rückkopplung zur Verkehrsverteilung und -aufteilung gibt, also auch keinerlei Verlagerungen in der Ziel- und Moduswahl stattfinden.

Wir betrachten also Verkehrsumlegungen, innerhalb derer die Nachfrage nicht vom Ergebnis der Umlegung, also den Reisezeiten, abhängt. Ausgehend von einer vorgegebenen Nachfragematrix, die für einen Modus die Nachfrage für alle Quelle-Ziel-Relationen enthält, läuft ein Umlegungsverfahren vereinfacht wie folgt ab (FRIEDRICH ET AL. (2019a), CASSETTA (2001)):

1. Routensuche und -berechnung:

Abhängig vom Routenwahlmodell werden Routen mit einem geeigneten Suchverfahren ermittelt. Für Bestwegumlegungen werden Optimalroutensuchverfahren angewendet und für Mehrwegumlegungen kommen Alternativroutensuchverfahren zum Einsatz. Letztere können Mehrwegalgorithmen oder Optimalroutensuchverfahren mit jeweils anderen Ausgangsbedingungen mehrfach nutzen. (LOHSE UND SCHNABEL (2011b))

2. Routenwahl:

Die Anteile der Nachfrage, die auf die in Schritt 1 gefundenen Routen entfallen, werden anhand des Routenwahlmodells berechnet. Auf Routenwahlmodelle und zugehörige Lösungsverfahren wird in diesem Kapitel noch genauer eingegangen.

3. Routen- und Netzbelastung:

Nachfragewerte der Quelle-Ziel-Relationen bzw. Anteile davon werden auf eine oder mehrere Routen verteilt. Die Summe aller Routenbelastungen entspricht der Belastung des Netzes.

Sofern es sich nicht um auslastungsunabhängige Umlegungsverfahren handelt, sind weitere Schritte nötig, die bis die von der nutzenden Person vorgegebenen Konvergenzkriterien erfüllt sind, in einer Schleife ablaufen.

4. Aktualisierung der Widerstände:

Abhängig von der Widerstandsfunktion und damit, wenn so abgebildet, von der Fahrtzeit im belasteten Zustand. Widerstände werden zunächst für einzelne Netzelemente wie Strecken berechnet und anschließend für die Bestimmung von Routenwiderständen zusammengefasst. Hier kann ein verkehrsnachfragebasiertes Fahrtzeitermittlungsverfahren eingesetzt werden.

5. Konvergenzprüfung:

Berechnung der Werte der Konvergenzkriterien und Abgleich mit den Nutzervorgaben. Dies kann das erneute Suchen nach geeigneten Routen, die einen geringeren Widerstand als die bisher belasteten aufweisen, beinhalten. Somit umfasst die Konvergenzprüfung Elemente von Schritt 1. Falls keine Konvergenz im Sinne der Nutzervorgaben vorliegt, wird wieder mit Schritt 2 fortgefahren.

Routenwahlmodelle

Routenwahlmodelle lassen sich anhand mehrerer Kriterien klassifizieren. Eine Möglichkeit ist die Unterscheidung hinsichtlich der Zeitachse. Für dynamische Routenwahlmodelle wird die Zeitachse berücksichtigt und eine zeitliche Auflösung aller Fahrten ist notwendig, da der Abfahrtszeitpunkt entscheidend ist. Bei der statischen Routenwahl werden alle Fahrten gleichzeitig umgelegt.

Eine andere Unterteilung kann danach erfolgen, ob die Routenwahl abhängig von der Auslastung ist (CASCETTA (2001)). Ein auslastungsunabhängiges Routenwahlmodell verteilt die Fahrten auf Grundlage der Routenwiderstände im unbelasteten Zustand. Im deterministischen (siehe unten) Fall entspricht dies der Bestwegumlegung, auch Alles-oder-nichts-Umlegung genannt (frei übersetzt nach CASCETTA (2001)). Umlegungsverfahren, die eine auslastungsabhängige Routenwahl der Verkehrsteilnehmer unterstellen, nutzen Fahrzeitermittlungsverfahren wie beispielsweise kapazitätsabhängige Fahrzeitermittlungsmodelle, bei denen die Fahrzeiten auslastungsabhängig sind. Auslastungsabhängige Umlegungsverfahren sind weiterhin unterteilbar nach Prinzip, dem das Routenwahlmodell folgt. Die Routenwahl kann in mehreren Schritten mit vorgegebenen Anteilen aller Fahrten inkrementell erfolgen, oder einen bestimmten objektiven oder subjektiven Gleichgewichtszustand anstreben.

Die Unterscheidung nach objektiver oder subjektiver Beurteilung von Aufwänden bzw. Widerständen durch die Verkehrsteilnehmer im Netz legt fest, ob es sich um ein deterministisches oder um ein stochastisches Routenwahlmodell handelt. Bei der deterministischen Routenwahl soll der objektive Aufwand minimiert werden. Dabei wird unterstellt, dass die Entscheidung für eine Route aufgrund von der für alle gleichen und vollständigen Kenntnis bzw. Information über die Zustände im Netz getroffen wird. Die Minimierung der Aufwände folgt dabei einem der beiden Prinzipien von WARDROP (1952). Wenn für alle der objektive Aufwand identisch ist, handelt es sich um das deterministische Nutzergleichgewicht und wenn der objektive Aufwand von allen in Summe minimal ist, wird dieser Zustand als Systemoptimum bezeichnet.

Das Vorliegen vollständiger Informationen für die Verkehrsteilnehmer kann im Ansatz damit begründet werden, dass ein großer Anteil der Verkehrsnachfrage aus regelmäßigen Fahrten resultiert, z. B. wie die Fahrt zur Arbeitsstelle werktags zu ähnlichen Zeiten. Die Verkehrsteilnehmer kennen die in Frage kommenden Routen und wählen die für sie beste Route. Ohne Änderungen im Verkehrsnetz kommt es dadurch zu wiederkehrenden Zuständen mit in Summe weitgehend gleichbleibender Routenwahl der Verkehrsteilnehmer.

In Fall von stochastischen Umlegungen wird der subjektive empfundene Aufwand minimiert. Es wird unterstellt, dass die Entscheidung über die Route auf Basis unvollständiger Kenntnis bzw. Information und individuellen Präferenzen beruht. Der subjektive Aufwand setzt sich dabei aus dem objektiven Aufwand und einem zufallsabhängigen, subjektiven Aufwandsbetrag zusammen (LOHSE UND SCHNABEL (2011b)). Für die Berechnung von Wahrscheinlichkeiten für Routenalternativen kommt ein ökonometrisches

Entscheidungsmodell (z. B. Kirchhoff oder Logit) zum Einsatz. Diese Modelle unterscheiden sich in ihrer Bewertungsfunktion. Je nach Ausgestaltung dieser Bewertungsfunktion werden Routenalternativen unterschiedlich bewertet, was wiederum zu unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten für die Wahl dieser Routen führt.

Entscheidend für die Routenwahl ist neben dem gewählten Entscheidungsmodell auch, in welcher Art die Aufwände der Routen miteinbezogen werden sollen. Dies kann bei sich überlappenden Routen zu Unterschieden führen. Man spricht hier auch von der Eigenständigkeit der Routen. LOHSE UND SCHNABEL (2011b) zeigen mit verschiedenen Annahmen und zugehörigen Beispielen Unterschiede auf.

Eine Auswahl von Beispielen für Routenwahlmodelle und deren Bezeichnungen ergeben sich aus der Kombination obiger Unterteilungen:

- Deterministisch und auslastungsunabhängig: DUN (deterministic uncongested network), entspricht der Bestwegumlegung,
- Deterministisch und auslastungsabhängig: DUE (deterministic user equilibrium),
 - statisch oder dynamisch,
- Stochastisch und auslastungsunabhängig: SUN (stochastic uncongested network),
- Stochastisch und auslastungsabhängig: SUE (stochastic user equilibrium),
 - statisch oder dynamisch.

Lösungsverfahren

Die Berechnung der Routenwahl kann je nach angenommenem Modell die Anwendung von Algorithmen erfordern, die ein vom Routenwahlmodell abgeleitetes Optimierungsproblem lösen. Die Auswahl eines geeigneten Lösungsverfahrens hängt maßgeblich davon ab, welches Routenwahlmodell in einer Umlegung verwendet werden soll.

Für die Suche nach der Route mit dem geringsten Aufwand werden Optimalroutensuchverfahren eingesetzt. Ein bekannter Vertreter ist der Dijkstra-Algorithmus (LOHSE UND SCHNABEL (2011b)). Er kann für auslastungsunabhängige, deterministische (Best-Weg-) Umlegungen angewendet werden. Für den auslastungsunabhängigen und stochastischen Fall wird direkt ein Entscheidungsmodell eingesetzt.

Für auslastungsabhängige Umlegungen fixer Nachfrage bietet sich für das Bestimmen stochastischer Nutzergleichgewichte beispielsweise das Verfahren MSA-FA (Method of Successive Averages – Flow Averaging) an (CASCETTA (2001)). Bei deterministischen Gleichgewichtsumlegungen können sogenannte Gradientenabstiegsverfahren wie der Frank-Wolfe-Algorithmus oder MSA (Method of Successive Averages) als Sonderfall exponentieller Glättung angewendet werden (CASCETTA (2001), LOHSE UND SCHNABEL (2011b)).

Es gibt für jeden Fall eine Vielzahl von passenden Lösungsverfahren. Dieser Abschnitt nennt lediglich Beispiele. Im Folgenden wird weiter auf deterministische Gleichgewichtsumlegungen eingegangen.

Lösungsverfahren für deterministische Gleichgewichtsumlegungen

Die Prüfung auf Konvergenz (Schritt 5 im generellen Ablauf von Umlegungen) für deterministische Gleichgewichtsumlegungen erfolgt über einen Abgleich des Relative Gap G mit einem vorgegebenen Wert. Der Relative Gap gibt an, in welchem Umfang der tatsächliche Verkehrszeitaufwand einer aktuellen Lösung von einem hypothetischen Verkehrszeitaufwand abweicht. Letzterer wird nach einer weiteren Routensuche berechnet, indem angenommen wird, dass alle Fahrzeuge die kürzeste Route wählen. Die Berechnung erfolgt nach Formel (19) (BOYCE ET AL. (2004)).

$$G = \frac{V_{Ist} - V_{Hypo}}{V_{Hypo}} \quad (19)$$

mit

V_{Ist} tatsächlicher Verkehrszeitaufwand im Netz in Fahrzeugstunden

V_{Hypo} hypothetischer Verkehrszeitaufwand im Netz in Fahrzeugstunden

BOYCE ET AL. (2004) zeigen, dass der Relative Gap G für eine stabile Konvergenz bezogen auf streckenbezogene Verkehrsstärken mindestens den Wert 0,0001 unterschreiten muss. Eine nachgewiesene Konvergenz in diesem Sinne für das Nutzergleichgewicht bedeutet nicht zwingend, dass eine Lösung eindeutig ist. Die Bedingung des Nutzergleichgewichts – alle Verkehrsteilnehmer nutzen die objektiv beste Route – kann mit vielen Varianten der Aufteilung der Fahrzeuge auf Routen erfüllt werden. Lediglich die Streckenbelastungen und die damit verbundenen Aufwände sind dann eindeutig im Sinne der vorgegebenen Konvergenz bestimmt.

Die Berechnungsverfahren für Umlegungen, die ein deterministisches Nutzergleichgewicht annehmen, lassen sich grundsätzlich in drei Gruppen einteilen, die im Folgenden in Anlehnung an BAR-GERA (1999) kurz umschrieben werden:

- **Streckenbasierte Verfahren (link-based):**
Zwischen den Iterationen dieser Verfahren werden die über alle Relationen zusammengefassten Verkehrsstärken ausschließlich auf Ebene der Strecken gespeichert. Der Speicherbedarf ist gering, die Lösungsgenauigkeit für vertretbare Rechenzeiten jedoch teilweise nicht sehr hoch. Das realistische Abbilden der proportionalen Aufteilung von Fahrzeugen eines oder mehrerer Verkehrssysteme auf für mehrere Quelle-Ziel-Relationen relevante Routen kann mit streckenbasierten Verfahren nicht garantiert werden. Die meisten Lösungsverfahren sind streckenbasiert, so auch die schon erwähnten Verfahren MSA und Frank-Wolfe.
- **Routenbasierte Verfahren (route-based):**
Diese Verfahrensklasse bedarf eines hohen Speicherbedarfs, da die Verkehrsstärken aller Routen für alle Relationen zwischen den Iterationen separat gespeichert werden. Auch die Lösungsgenauigkeit steigt, jedoch leidet die Anwendbarkeit für große Netze aufgrund des damit verbundenen Speicherbedarfs.

- Quellbasierte Verfahren (origin-based):
Quellbasierte Verfahren speichern separat für jede Quelle, aber aggregiert für alle Ziele die Verkehrsstärken auf Streckenebene. Die Verfahrensklasse zeichnet sich durch eine mit der zu routenbasierten Verfahren äquivalenten Genauigkeit bei gleichzeitig geringerem Speicherbedarf aus und benötigt weniger Rechenzeit für große Netze als streckenbasierte Verfahren.

Routen- und quellbasierte Verfahren können Routenproportionalität implizit berücksichtigen, für streckenbasierte Verfahren kann diese nur durch nachgelagerte Verfahren erreicht werden.

Die ebenfalls in der Literatur vorkommende Klasse der buschbasierten (frei übersetzt nach englisch bush-based) Verfahren kann je nach konkretem Ansatz den routen- oder quellbasierten Verfahren zugeschrieben werden.

Simultanumlegung

Falls eine Umlegung mehr als eine Nutzergruppe umfasst, handelt es sich um eine Simultanumlegung. In der englischsprachigen Literatur ist dann von einem multi-class assignment als Gegenstück zum single-class assignment (mit nur einer Nutzergruppe) die Rede.

Die Einteilung nach Nutzergruppen kann anhand von Kriterien wie physikalischen Eigenschaften des Fahrzeugs (Pkw, Lkw), Routenwahlpräferenzen (Fahrerpräferenzen, Fahrtzweck, Navigationshilfen) oder Straßennetzrestriktionen (Streckensperrungen) erfolgen.

Das Berechnen von Simultanumlegungen ist anspruchsvoller, vor allem, wenn Asymmetrie vorliegt. Das ist vereinfacht ausgedrückt beispielsweise dann der Fall, wenn eine Nutzergruppe eine andere stärker beeinflusst als umgekehrt. YOOK (2014) definiert die Asymmetrie auf verschiedenen Ebenen wie folgt:

- Streckeninteraktionen:
Der Widerstand einer Strecke hängt nicht nur von Verkehrsstärke auf dieser Strecke ab, sondern auch von der einer anderen.
Beispiel: Es sind weniger Überholmanöver möglich, wenn die Gegenrichtung stärker ausgelastet ist. Jedes Fahrzeug in der Gegenrichtung wirkt anders, als ein zusätzliches Fahrzeug in der Hinrichtung der Strecke.
- Routeninteraktionen:
Der Widerstand einer Route als Summe der Widerstände aller einzelnen Strecken entspricht nicht dem Widerstand der finalen, kompletten Route.
Beispiel: Maut, die streckenabhängig erhoben wird, aber für mehrere Strecken in Reihe geringer ist als im Vergleich zur Summe der Maut für alle einzelne Strecken.
- Nutzergruppeninteraktionen:
Es sind verschiedene Widerstandsfunktionen für Nutzergruppen auf denselben Strecken hinterlegt.
Beispiel: Entweder werden unterschiedliche CR-Funktionen (Funktionstyp oder

Parametersätze) angenommen oder für verschiedene Nutzergruppen kommen zusätzliche Widerstandsanteile oder multiplikative Faktoren nachgelagert hinzu.

MARCOTTE UND WYNTER (2004) argumentieren, dass eine Simultanumlegung praktisch immer asymmetrisch ist, da sonst keine Simultanumlegung nötig gewesen wäre und mehrere „einfache“ Umlegungen mit einer Nutzergruppe in Reihe ausgereicht hätten.

Ein Ansatz zur Lösung des Gleichgewichtsproblems einer asymmetrischen Simultanumlegung ist die Diagonalisierung (CASCETTA (2001)). Diese Methode, auch als Jacobi-Ansatz bekannt, fixiert im Wesentlichen sequenziell den asymmetrischen Teil der Widerstandsfunktionen, der in diesem Fall die Widerstandsinteraktionen zwischen den Nutzergruppen repräsentiert. Somit werden iterativ Probleme gelöst, die die Monotoniebedingung erfüllen und somit äquivalente konvexe Kostenoptimierungsprobleme sind. Alle Nutzergruppen werden dabei sequenziell betrachtet.

CASCETTA (2001) führt für die Anwendung der Diagonalisierung als Bedingung für die Existenz einer Lösung an, dass die Widerstandsfunktionen aller Nutzergruppen bezüglich aller Nutzergruppen-Verkehrsstärken kontinuierlich sein müssen. Des Weiteren sind die Bedingungen für die Eindeutigkeit einer Lösung eine streng monotone Steigung dieser Funktionen bezüglich aller Nutzergruppen-Verkehrsstärken und die Symmetrie bezüglich der Widerstandsfunktionen der Nutzergruppen. Letztere gilt als hinreichende Bedingung.

CASCETTA (2001) merkt an, dass – wie auch bereits oben beschrieben – diese letzte Bedingung für Simultanumlegungen nur sehr selten erfüllt ist und somit keine Eindeutigkeit der Lösung des Gleichgewichtsproblems mit asymmetrischen Widerstandsfunktionen gewährleistet werden kann. Da diese Bedingung nicht notwendig ist, bedeutet das aber auch, dass bei Nichterfüllen derselben das Finden eindeutiger Lösungen nicht kategorisch auszuschließen ist.

Für den Origin-Based-Algorithm von BAR-GERA (2002), ein quellbasiertes Verfahren, wird für diesen Fall sogar angegeben, dass es keine theoretische Garantie für Konvergenz gibt (BAR-GERA (2002)).

Nichtsdestotrotz besteht die Anforderung an ein Umlegungsverfahren darin, ein Lösungsverfahren zu nutzen, das auch für den Fall einer Simultanumlegung in der Lage ist, extreme Ergebnisse zu vermeiden. Es gilt dann umso mehr, das Umlegungsergebnis auf Auffälligkeiten hin zu überprüfen.

2.4 Zeitwert und Zeitwahrnehmung

Im Rahmen der Evaluierung verkehrspolitischer Maßnahmen und Verkehrsinfrastrukturinvestitionen werden häufig Reisezeitersparnisse als Nutzen für die Volkswirtschaft herangezogen. Damit diese den Kosten für eine Maßnahme gegenübergestellt werden können, ist eine Umrechnung der Zeitersparnisse in Geldeinheiten notwendig. Der Zeit

muss also ein Wert zugeschrieben werden. Dieser Zeitwert ist als value of time oder value of travel time in der Literatur bekannt. (ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011))

In der Verkehrsnachfragemodellierung spielt die Wahrnehmung von Verkehrsaufwänden eine zentrale Rolle (LOHSE UND SCHNABEL (2011b)). Aufwände für Ortsveränderungen können durch Kenngrößen wie Distanzen, Fahrtzeiten, Wartezeiten und Kosten beschrieben und für die Entscheidungen von Verkehrsteilnehmern in einer Nutzenfunktion zusammengefasst werden. Allgemeine Grundformen für derartige Funktionen werden innerhalb der Ziel- und Moduswahl in Kapitel 2.3.2 gezeigt. Um die Werte von Kenngrößen zu vereinheitlichen, ist auch eine Umrechnung zwischen den Einheiten notwendig. Die Kenntnis des Zeitwerts ist damit Voraussetzung für das Bestimmen des Nutzens einer Alternative.

Es ist zu beachten, dass zwischen dem Zeitwert für die Beurteilung von Verkehrsprojekten und dem Zeitwert als individuelle Einschätzung unterschieden werden muss. Ersterer wird für alle Reisenden als gleich angesetzt, während Letzterer u. a. vom Wegezweck, Verkehrsmodus und Merkmalen des Reisenden abhängt. (GUNN UND SILLAPARCHARN (2007), ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011), WARDMAN ET AL. (2016))

In Anlehnung an die allgemeine Nutzenfunktion aus Formel (12) für die Moduswahl zeigt Formel (20) eine Variante, bei der die Kenngrößen Fahrtzeit, Wartezeit und Kosten inkludiert sind. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden Indizes und Superskripte für Nachfragegruppe, Quell- und Zielverkehrszelle und Modus nicht dargestellt.

$$v = \beta_0 + \beta_{t^v} \cdot x_{t^v} + \beta_{t^w} \cdot x_{t^w} + \beta_c \cdot x_c \quad (20)$$

mit

v	Nutzen der Ortsveränderung
β_0	modusspezifische Nutzenkonstante
β_{t^v}, β_{t^w}	Aufwandsempfindlichkeitsparameter gegenüber Fahrt- und Wartezeit
β_c	Aufwandsempfindlichkeitsparameter gegenüber den Kosten c
x_{t^v}, x_{t^w}	Fahrtzeit und Wartezeit in Zeiteinheiten
x_c	Kosten in Geldeinheiten

Unabhängig davon, ob der Nutzen nun in Zeit- oder Geldeinheiten ausgedrückt wird, erfolgt die Umrechnung der Kenngrößen mit den zugehörigen Aufwandsempfindlichkeitsparametern entsprechend so, dass sich die Produkte in ihrer Einheit angleichen. Die Parameter erfüllen weiterhin die Aufgabe, anzugeben, wie die Kenngrößen von der Nachfragegruppe wahrgenommen werden. Ist β_{t^w} doppelt so groß wie β_{t^v} , bedeutet das, dass die Wartezeit als doppelt so schlimm empfunden wird, wie die Fahrtzeit im Fahrzeug. Der Zeitwert für die Fahrtzeit (value of in-vehicle time) lässt sich ebenfalls mit den Parametern ermitteln und ergibt sich aus dem Verhältnis von β_{t^v} zu β_c . (ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011))

Der Zeitwert bzw. die Aufwandsempfindlichkeitsparameter sind ein Input für Wahlmodelle und können aus empirisch gewonnenen Daten geschätzt werden. Dabei kommen Methoden zum Einsatz, die Verkehrsteilnehmer zu deren vergangenem (revealed) oder hypothetischem (stated) Wahlverhalten in definierten Entscheidungssituationen befragen. Einen Überblick zu sogenannten Stated-Response-Befragungen geben AXHAUSEN UND SAMMER (2001). Mit den so gewonnenen Daten können Entscheidungsmodelle samt Parametern geschätzt werden, die möglichst exakt das in den Daten abgebildete Wahlverhalten replizieren. Einige Methoden samt Erläuterungen hierzu finden sich in BOYCE UND WILLIAMS (2015).

Die Ermittlung von Zeitwerten zielt üblicherweise darauf ab, einer Zeitdifferenz einen Wert zuzuweisen. DALY UND HESS (2020) zeigen jedoch, dass eine Asymmetrie bezüglich der Bewertung von Zeitverlusten oder Zeitgewinnen durch Reisende vorliegt, denn diese ordnen Zeitverlusten in der Regel einen höheren Wert zu als Zeitgewinnen. Der Zeitwert, der in der Praxis verwendet wird, entspricht dann dem geometrischen Mittel aus den Werten für gesparte und verlorene Zeit und wird gar als wichtigste Größe in der Verkehrswirtschaft bezeichnet (DALY UND HESS (2020)). Das große Interesse der Forschung an Zeitwerten wird auch durch die große Anzahl an Studien, die diese bestimmen wollen, ersichtlich. WARDMAN ET AL. (2016) führen dazu eine Metaanalyse durch, die auf 389 Studien aus Europa basiert.

Ausgehend von der Annahme, dass die Zeitwahrnehmung über Zeitwerte in die Bestimmung der Nutzenwerte von Zielen, Modi und Routen eingeht, lässt sich schlussfolgern, dass sich die Zeitwahrnehmung in der Verkehrsnachfragemodellierung auf alle Modellstufen außer auf die Verkehrserzeugung auswirkt.

2.5 Induzierter Verkehr

Verkehrsplanungsmodelle sind ein Werkzeug, um die Wirkungen von Maßnahmen abzuschätzen. Diese Modelle sind u. a. in der Lage die Anzahl der Wege und Verkehrsleistung sowie -zeitaufwand für verschiedene Verkehrsmodi zu berechnen. Gewisse Wirkungen lassen sich unter dem Begriff induzierter Verkehr zusammenfassen. Die folgenden Erläuterungen hierzu orientieren sich an den Hinweisen der FGSV (2005b).

Als induzierten Verkehr wird die Gesamtheit aller durch eine verkehrswirksame Maßnahme verursachten Verkehrsmengen- und Verkehrsaufwandsveränderungen bezeichnet. Dies beinhaltet den verlagerten und neu hinzukommenden Verkehr und die Verkehrsaufwände, die sich durch die induzierten Verkehrsmengen und durch Änderungen in der Routenwahl ergeben.

Änderungen der Routenwahl bei gleichbleibenden Verkehrsmengen auf allen Relationen entsprechen intramodalen Verlagerungen. Bei ebenfalls gleicher Verkehrsnachfrage in Summe über alle Modi, bei der ein Anteil der Nachfrage den Modus wechselt, liegen intermodale Verlagerungen vor. Interlokale Verlagerungen stehen für eine Verschiebung

der Verkehrsmengen zwischen Relationen, bei der die Gesamtnachfrage gleichbleibt. Die verschiedenen Arten verlagerten Verkehrs werden zur Bildung des induzierten Verkehrs schließlich ergänzt durch den Neuverkehr, durch den sich die Gesamtverkehrsmenge ändert.

Die durch eine Maßnahme kurzfristig hervorgerufenen Änderungen der Verkehrsmengen oder -aufwände beschreiben den primär induzierten Verkehr. Dieser kann langfristig Änderungen der Raum-, Siedlungs- oder Wirtschaftsstruktur verursachen, was wiederum zu zusätzlichen Verkehrsverlagerungen und Neuverkehren, dem sekundär induzierten Verkehr, führen kann.

Im Zusammenhang mit dem induzierten Verkehr wird auch das konstante Reisezeitbudget von Verkehrsteilnehmern als eine Erklärung angeführt (FGSV (2005b), ZAHAVI (1979)). Das konstante Reisezeitbudget sagt aus, dass die durch beispielsweise den Infrastrukturausbau entstandenen Reisezeitersparnisse für weiteren Verkehr aufgewendet werden, sodass sich die im Verkehr verbrachte Zeit nicht in relevantem Maße ändert (ZAHAVI (1979)).

Als weiterführende Lektüre, in der die Erkenntnisse vieler Studien zur Thematik induzierter Verkehr zusammengefasst und diskutiert werden, sei auf LITMAN (2021a) verwiesen.

Ein weiterer Effekt, der eine Nachfragereaktion auf eine Änderung beschreibt, ist der Rebound-Effekt. Er entspricht allgemein der Ressourcen-Mehrnachfrage, welche durch eine erhöhte Ressourcen-Effizienz induziert wird. Das Umweltbundesamt definiert ihn als Sekundäreffekt einer technischen oder politischen Maßnahme, welcher dem ursprünglichen Ziel der Maßnahme entgegenwirkt (HAAN ET AL. (2015)). Gewinne durch Effizienzsteigerungen manifestieren sich nicht wie erwartet, weil es eine Änderung des Nachfrageverhaltens gibt, die durch die Effizienzsteigerung ausgelöst wird. Nimmt die Effizienz um 10 % zu, wäre bei gleichbleibender Nachfrage ein um 10 % reduzierter Ressourcenbedarf zu erwarten. Lässt sich nun aber beobachten, dass als Folge der Effizienzänderung der Ressourcenbedarf lediglich um 4 % zurückgeht, liegt ein Rebound-Effekt von 60 % vor, da der Bedarf um 60 % weniger zurückgeht, als erwartet. Ausprägungen der Mehrnachfrage sind eine ressourcenintensivere Nutzung, eine häufigere Nutzung oder der Verbrauch von mehr Einheiten. (HAAN ET AL. (2015))

Das Konzept des Rebound-Effekts entstammt der Energieökonomie, kann aber auch im Verkehrskontext beobachtet werden. Ein klassisches Beispiel für den MIV wäre die Kraftstoffeffizienz, deren Erhöhung die Fahrtkosten reduziert und die Nachfrage erhöht. Die Menschen fahren weiter oder öfter und letzten Endes wird wenig oder gar kein Kraftstoff eingespart. Äquivalent zu betrachten wäre dieselbe Nachfrageänderung aufgrund von Fahrtzeitersparnissen.

HAAN ET AL. (2015) unterscheiden mehrere Arten des Rebound-Effekts, die im Folgenden kurz erläutert werden. Wenn das Nutzungsverhalten des Produkts durch eine Effizienzsteigerung des Produkts selbst verursacht ist, handelt es sich um den direkten Rebound. Sollte eine erhöhte Effizienz das Nutzungsverhalten für ein anderes Produkt beeinflussen, ist das der indirekte Rebound-Effekt. Beispielsweise könnte die Anzahl der

Flugreisen zunehmen, wenn Verkehrsteilnehmer Ersparnisse beim Pkw-Kraftstoffverbrauch erfahren. Ein gesamtwirtschaftlicher Rebound umfasst die makroökonomischen Folgen aus direkten Rebound-Effekten. Effizientere Pkw führen zu einer höheren Verkehrsleistung, welche wiederum dazu führen kann, dass Pkw häufiger gewartet werden müssen oder der Verschleiß der Infrastruktur zunimmt. Beides würde entsprechend zu einem höheren Ressourcenverbrauch führen.

Als Größenordnung für den direkten Rebound-Effekt im MIV durch Energieeffizienzsteigerungen gibt SORRELL (2007) nach einer Auswertung von 17 Studien den Bereich von 5-87 % an. Als einen „best guess“ wird der Bereich von 10-30 % für Rebounds, die als realistisch und frei von gleichzeitigen Wachstumseffekten angesehen werden können, kommuniziert. Betrachtete Kenngrößen für die Angabe des Rebounds in den Studien beziehen sich dabei meist auf zurückgelegte Distanzen.

Ob der Rebound-Effekt dem induzierten Verkehr zugerechnet werden kann oder soll, wird durch die dem Autor bekannten Veröffentlichungen nicht endgültig geklärt. Falls eine Effizienzsteigerung als verkehrswirksame Maßnahme interpretiert wird, könnte der Rebound dem primär induzierten Verkehr zugeschrieben werden. Lediglich HYMEL ET AL. (2010) fassen beide als „feedback effects“ zusammen, trennen die Begriffe allerdings anhand der Ursache. Ihnen zufolge wird induzierter Verkehr durch Änderungen der Straßenkapazität verursacht, während Rebound-Effekte durch die Verbesserung der Kraftstoffeffizienz begründet sind.

2.6 Zwischenfazit

Die Verkehrsstärke und die Kapazität geben an, wie viele Fahrzeuge je Zeiteinheit einen Querschnitt passieren oder passieren können. Aufgrund der beobachteten Varianz der Kapazität kann diese allerdings auch als stochastisch und damit als nicht konstant interpretiert werden. Die Leistungsfähigkeit entspricht dem Produkt aus Fahrzeugen und deren mittlerer Geschwindigkeit für einen Streckenabschnitt. Damit wird implizit dem Verhältnis aus Verkehrsnachfrage und Verkehrsangebot Rechnung getragen.

Das Konzept der Pkw-Einheiten ermöglicht die einheitliche Angabe von Verkehrsstärken und Kapazitäten durch eine Umrechnung verschiedener Verkehrssysteme in eben diese Einheit herkömmlicher Pkw. Die Umrechnung setzt allerdings die Kenntnis über den Einfluss der Verkehrssysteme auf den Verkehrsfluss voraus. Dieser hängt von Fahrzeugeigenschaften wie Größe, Gewicht und Leistung, aber auch von Charakteristika der Straßen, des Verkehrszustands oder der Steuerung ab. Pkw-Einheiten-Faktoren geben indirekt die Leistungsfähigkeit eines Verkehrssystems an.

Für die Ermittlung der Kapazität können deterministische oder stochastische Verfahren angewandt werden. Deterministische Kapazitätsmodelle bilden die fundamentalen Zusammenhänge zwischen den Größen Verkehrsdichte, Verkehrsstärke und mittlere Geschwindigkeit mit Funktionen ab. Die Kapazität wird als maximale Verkehrsstärke und

somit durch einen Wert wiedergegeben. Stochastische Kapazitätsmodelle schätzen beispielsweise mithilfe der Statistik zensierter Daten eine Verteilungsfunktion, die in Abhängigkeit der Verkehrsstärke die Wahrscheinlichkeit für einen Verkehrszusammenbruch angibt. Das Modell nach van Aerde wird stellvertretend als ein Verfahren der Klasse deterministischer Modelle vorgestellt.

Die Fahrtzeit als wichtiger Teil der Reisezeit stellt eine Grundlage für Wahlentscheidungen von Verkehrsteilnehmern dar und kann auch als Kenngröße zur Bewertung der Verkehrsablaufqualität herangezogen werden. Es werden Kategorien von Verfahren zur Ermittlung der Fahrtzeit für den IV vorgestellt. Innerhalb der verkehrsnachfragebasierten Fahrtzeitmodellierungsmethoden werden die Kapazitätsbeschränkungsfunktionen detaillierter erläutert. Diese berechnen aus der Fahrtzeit im unbelasteten Zustand und der Auslastung die Fahrtzeit im belasteten Zustand für ein Netzelement. Es gibt verschiedene Arten von Kapazitätsbeschränkungsfunktionen, die jeweils mit der Wahl geeigneter Werte für die Funktionsparameter versuchen, den Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und Fahrtzeit möglichst realistisch abzubilden.

Die Einführung zu Verkehrsplanungsmodellen umfasst eine Übersicht über die Modellierung von Verkehrsangebot und -nachfrage. Es wird gezeigt, aus welchen Objekten das Netzmodell besteht, welches grundlegend für das Verkehrsangebot ist. Anschließend werden die Modellstufen erläutert, die Verkehrsnachfragemodelle sequentiell, mit Rückkopplung oder kombiniert durchlaufen, um die Verkehrsnachfrage zu ermitteln. Für Verkehrsumlegungen wird das Verständnis vertieft. Für Simultanumlegungen, bei denen sich verschiedene Nutzergruppen gegenseitig unterschiedlich beeinflussen, kann die Eindeutigkeit der Lösung für eine Gleichgewichtsumlegung nicht mehr garantiert werden. Ziel einer Gleichgewichtsumlegung ist, einen Zustand zu erreichen, in dem kein Verkehrsteilnehmer einen Vorteil daraus ziehen kann, die Route zu wechseln.

Welchen Wert Zeitersparnissen zugewiesen wird, ist für die Evaluierung von verkehrspolitischen Maßnahmen von großer Relevanz. Die Wahrnehmung und Bewertung der Zeit, die Verkehrsteilnehmer für eine Ortsveränderung aufbringen müssen, ist für die Verkehrsnachfragemodellierung ebenfalls bedeutend. In Nutzenfunktionen, die den Wahlalternativen für Ziel, Modus oder Route Werte beimessen, müssen Kenngrößen verschiedener Einheiten zusammengefasst werden. Hierfür ist u. a. die Kenntnis über den Zeitwert für die Nachfragegruppe von Relevanz.

Das Kapitel schließt mit der Thematik des induzierten Verkehrs, der die Änderungen von Verkehrsmengen und Verkehrsaufwänden, die von einer Maßnahme verursacht werden, umfasst. Verkehrsverlagerungen aufgrund einer veränderten Ziel-, Modus- oder Routenwahl als auch Neuverkehr zählen zum induzierten Verkehr. Folgt eine Steigerung der Verkehrsnachfrage einer Effizienzsteigerung, so handelt es sich um einen Rebound-Effekt. Dieser Effekt besagt beispielsweise, dass MIV-Verkehrsteilnehmer aufgrund eines geringeren Kraftstoffverbrauchs längere und/oder mehr Wege zurücklegen.

3 Automatisiertes Fahren

Automatisiertes Fahren ist keinesfalls ein neues Thema. Bereits seit den 1980er Jahren gibt es Forschungsprojekte der Europäischen Union (EU), die sich damit beschäftigen und seit 2010 nimmt die Ausrichtung internationaler Forschungsaktivitäten darauf stark zu (BMVI (2015)). Eine Übersicht zu den zahlreichen Forschungsprojekten und Initiativen auf Ebene der EU und der Mitgliedsstaaten ist in ERTRAC (2019) zu finden. Für einen Überblick zu Testfeldern und Projekten zu automatisiertem Fahren in Deutschland sei auf den Testfeldmonitor (BAST (2021)) verwiesen. Des Weiteren sind bereits automatisierte Fahrfunktionen niedriger Automatisierungsgrade in Form von Fahrassistenzsystemen seit Jahren marktgängig verfügbar und werden im Straßenverkehr verwendet (BMVI (2015)).

Auch die Gesetzgebung in Deutschland hat der Wichtigkeit des Themas bereits Rechnung getragen, indem 2017 und 2021 jeweils Änderungen des Straßenverkehrsgesetzes beschlossen wurden (BUNDESTAG (2017), BUNDESTAG (2021)). In den Gesetzesänderungen werden sowohl gesetzliche Rahmenbedingungen für den Betrieb als auch Rechte und Pflichten des Fahrzeugführers für verschiedene Automatisierungsgrade festgelegt.

Zunächst werden die Stufen der Automatisierung erläutert und dadurch relevante Begriffe definiert. Es folgt ein allgemeiner Überblick zu den Auswirkungen und Anforderungen automatisierten Fahrens. Anschließend werden die Methoden und Ergebnisse einiger Modellierungsstudien vorgestellt, die sich mit automatisierten Fahrzeugen beschäftigen.

3.1 Stufen der Automatisierung

Für die Unterscheidung der Automatisierungsgrade folgt die internationale Literatur der Klassifizierung der von der SAE (Society of Automotive Engineers) International veröffentlichten Norm J3016 (J3016:2021). Diese regelt Begrifflichkeiten und charakterisiert die Stufen der Fahrzeugautomatisierung.

Die Klassifizierung definiert sechs Stufen: von Stufe 0 „keine Automatisierung“ bis Stufe 5 „Vollautomatisierung“. Sie unterscheiden sich nach Zuständigkeiten von fahrender Person und automatisiertem Fahrsystem für die Fahraufgabe und die Rückfallebene für eben diese sowie den Bedingungen, unter denen diese Zuständigkeiten Bestand haben. Die Fahraufgabe besteht aus der Fahrzeugsteuerung und der Objekt- sowie Ereigniserkennung samt Reaktion auf diese.

Das automatisierte Fahrsystem wird im Folgenden mit ADS (automated driving system) abgekürzt. Ein ADS kann eine oder mehrere Fahrfunktionen umfassen. Diese können auch Funktionalitäten unterschiedlicher Automatisierungsstufen abdecken. Eine Fahrfunktion unterliegt Bedingungen, unter denen ein ordnungsgemäßer Betrieb möglich ist.

Diese Bedingungen werden unter dem Begriff Operational Design Domain (ODD) zusammengefasst. Die ODD gibt an, unter welchen Umständen eine Fahrfunktion des ADS fähig ist, die Fahrzeugsteuerung oder Objekt- und Ereigniserkennung zu leisten. Die ODD umfasst nach der Norm J3016 und CZARNECKI (2018) vor allem Restriktionen und Voraussetzungen im Sinne des Vorhandenseins oder Nichtvorhandenseins bezüglich der folgenden Eigenschaften:

- Fahrzeugumgebung:
 - Straßentypen (z. B. Autobahn, Landstraßen, Stadtstraßen),
 - Straßeneigenschaften (z. B. Fahrbahnmarkierungen, Tunnel, Baustellen),
 - Wetter-, Licht- und Sichtbedingungen,
 - Spezielle Umgebungseigenschaften (z. B. Geographische Restriktionen),
- Fahrzeugverhalten (z. B. Geschwindigkeit, Fahrmanöver),
- Fahrzeugzustand (z. B. Zuladung, Reifendruck).

Für eine ausführlichere Auflistung wichtiger Faktoren, die die ODD betreffen, sei auf KOOPMAN UND FRATRIK (2019) verwiesen. Sie listen ebenfalls Beispiele bezüglich der Objekt- und Ereigniserkennung auf.

Tabelle 1 zeigt die Klassifizierung der Automatisierungsstufen, wie sie in der Norm J3016 der SAE International definiert sind. Diese Stufen legen die Fähigkeit des Fahrzeugs bzw. des ADS, welches mindestens eine Fahrfunktion dieser Stufe beinhaltet, fest. Situationen, in denen die Rückfallebene einschreiten muss, betreffen das Verlassen der ODD oder Fehlfunktionen des ADS. Die Beschreibung der Stufen orientiert sich ebenfalls an der Norm J3016 (J3016:2021).

Stufe	Name	Fahrzeugsteuerung lateral und longitudinal	Objekterkennung, Ereigniserkennung und Reaktion	Rückfallebene für die Fahraufgabe	ODD
0	Keine Automatisierung	fahrende Person	fahrende Person	fahrende Person	-
1	Fahrassistenz	fahrende Person und ADS	fahrende Person	fahrende Person	limitiert
2	Teilautomatisierung	ADS	fahrende Person	fahrende Person	limitiert
3	Bedingte Automatisierung	ADS	ADS	chauffierte Person	limitiert
4	Hochautomatisierung	ADS	ADS	ADS	limitiert
5	Vollautomatisierung	ADS	ADS	ADS	unlimitiert

Tabelle 1: Definition der Automatisierungsstufen nach Norm J3016 (J3016:2021).

Für die Stufe 0 ist noch keine ODD nötig, weil keine automatisierte Fahrfunktion vorhanden ist. Die Fahraufgabe liegt allein bei der fahrenden Person. Stufe 1 beinhaltet Fahrassistenzfunktionen, die lateral oder longitudinal das Fahrzeug steuern. Beispiele hierfür wären ein Adaptiver Abstandsregler oder ein Spurhalteassistent. In der Stufe 2 erfolgt die Steuerung in lateraler und longitudinaler Dimension durch eine Funktion. Jedoch muss die fahrende Person wie auch in Stufe 1 durchgehend die Umgebung im Blick

behalten und das ADS überwachen, um jederzeit unmittelbar die Fahrzeugsteuerung zu übernehmen. Beispiel für eine Fahrfunktion der Stufe 2 ist eine Parkautomatik, die das Fahrzeug in eine Parklücke manövrieren kann.

Ein entscheidender Unterschied, der zwischen den Stufen 2 (Teilautomatisierung) und Stufe 3 (bedingte Automatisierung), besteht, ist das vollständige Übernehmen der Fahraufgabe durch das ADS innerhalb der ODD. Die das Fahrzeug nutzende, ehemals fahrende Person kann sich von der Fahrumgebung abwenden. Sie muss jedoch bereit sein, nach Aufforderung durch das ADS, in Situationen, die es erforderlich machen, die Fahraufgabe zu übernehmen. Fahrfunktionen der Stufe 3 werden beispielsweise Stau- oder Autobahnpiilot genannt.

ADS der Automatisierungsstufe 4 verfügen über Fahrfunktionen, die die nutzende Person zwar noch als Rückfallebene anfordern können, wenn sie ihre ODD verlassen, jedoch trotzdem in der Lage sind, das Fahrzeug bei einer ausbleibenden Reaktion der nutzenden Person eigenständig in einen risikominimalen Zustand zu bringen. Beispiele für Fahrfunktionen dieser Stufe der Hochautomatisierung sind ein noch fähigerer Autobahnpiilot oder ein Parkpiilot. Letztere können nach Aktivierung die Fahraufgabe auch ohne Anwesenheit einer Person durchführen. Mit Stufe 4 werden also auch Anwendungsfälle möglich, die, solange das ADS innerhalb der ODD operiert, komplett fahrerlos ablaufen.

Stufe 5 bezeichnet die Vollautomatisierung. Während die ODD für Fahrfunktionen der Stufen 1 bis 4 noch beschränkt waren, sind ADS der Stufe 5 in der Lage, die Fahraufgabe in allen Umgebungen und unter allen Umständen, in denen ein konventionelles Fahrzeug von einer Person gefahren werden kann und darf, auszuführen. Es gibt keine Limitationen für die ODD mehr.

Der Norm J3016 zufolge ist der Begriff *autonomous* (englisch für *autonom*) nicht mehr zu verwenden. In der englischsprachigen Fachliteratur wurde und wird diese Bezeichnung häufig synonym für vollautomatisierte Fahrzeuge verwendet (J3016:2021). Dies gilt ebenfalls für die deutschsprachige Fachliteratur und dem Begriff *autonom*. Als Beispiel ist die Veröffentlichung „Autonomes Fahren“ (MAURER ET AL. (2015)) zu nennen. In Übereinstimmung mit der Norm J3016, deren Klassifizierung der Automatisierungsstufen in dieser Arbeit verwendet werden, wird vom Gebrauch des Begriffs *autonom* abgesehen.

3.2 Verfügbarkeit und Marktdurchdringung automatisierter Fahrzeuge

Dieser Abschnitt soll dem Leser einen Einblick zu Prognosen über die Verfügbarkeit und Marktdurchdringung automatisierter Fahrzeuge geben. Als entscheidend für die Verbreitung von AV wird deren Akzeptanz in der Gesellschaft und die zugehörige Zahlungsbereitschaft angesehen. Daher wird auch auf diese Themen eingegangen und Erkenntnisse aus der Literatur präsentiert.

Verfügbarkeit

Neben dem Fortschritt der technologischen Entwicklung an sich hängt die Verfügbarkeit automatisierter Fahrzeuge oder Dienstleistungen, die die Nutzung dieser anbieten, auch vom Überwinden diverser Hindernisse ab. FAGNANT UND KOCKELMAN (2015) führen hierzu an, dass die Fahrzeuge auch zertifiziert werden müssen, d. h. deren Funktionalität und Sicherheit nachgewiesen werden muss. Dazu sind Testprozeduren notwendig, die jedoch auch Genehmigungen benötigen. Sie kritisieren, dass zu damaligem Stand sowohl dafür, als auch für Prüfverfahren landesweite Standards in den USA fehlen. Ferner sollten Fragen der Haftung ebenfalls im Vorfeld geklärt werden. (FAGNANT UND KOCKELMAN (2015))

KLEIN UND ALTENBURG (2019) analysieren Studien und Prognosen und verorten diese, getrennt nach der jeweiligen Automatisierungsstufe, auf einer Zeitachse von 2015 bis 2045. Abbildung 10 zeigt ihre Zusammenfassung der Prognosen zur Verfügbarkeit. Jeder blaue Kreis steht für eine Prognose und dunklere Kreise repräsentieren mehrere Prognosen. Die Abbildung macht deutlich, welche zeitliche Bandbreite für die erwartete Verfügbarkeit vorliegt. Es fällt auf, dass es viele Vorhersagen für hochautomatisierte Fahrzeuge (Stufe 4) gibt, die deren Marktreife im Zeitraum 2018-2023 verorten. Spätestens 2030 wären solche Fahrzeuge verfügbar. Es gilt allerdings zu beachten, dass für automatisierte Fahrzeuge, die nicht Stufe 5 zuzuordnen sind, die jeweilige ODD vorgibt, unter welchen Bedingungen diese über automatisierte Fahrfunktionen verfügen. Eine tiefgehende Analyse diesbezüglich bleibt in KLEIN UND ALTENBURG (2019) aus. Für vollautomatisierte Fahrzeuge (Stufe 5) ergibt sich ein Zeitraum für die Verfügbarkeit von 2028 bis 2043.

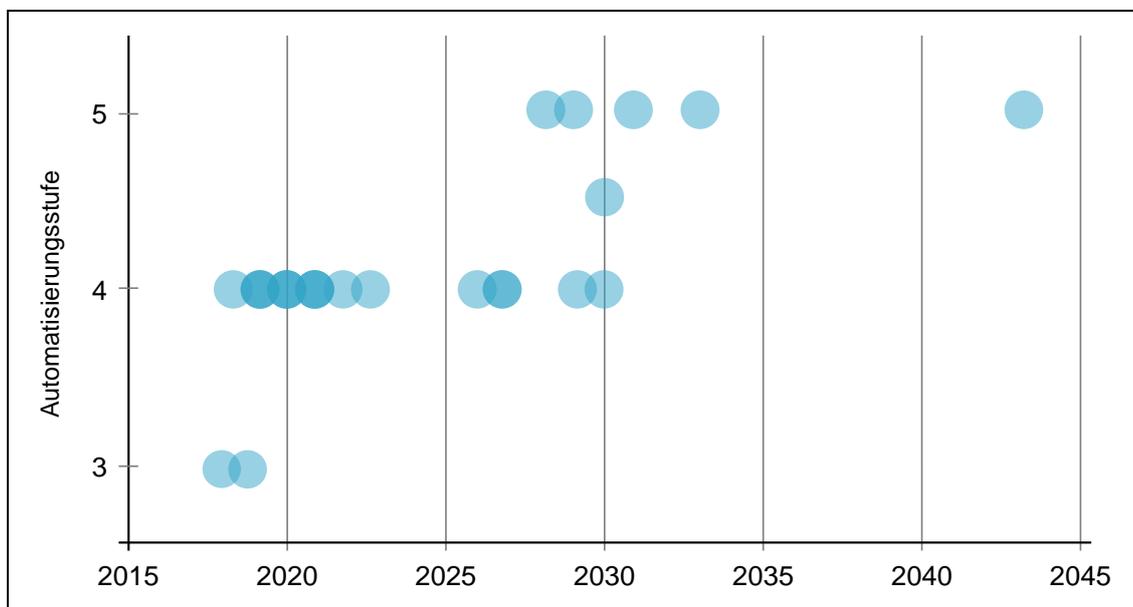


Abbildung 10: Vorhersagen für Verfügbarkeit je nach Automatisierungsstufe (blaue Kreise entsprechen Prognosen, eigene Darstellung in Anlehnung an KLEIN UND ALTENBURG (2019)).

Für Fahrzeuge, die man privat erwerben kann, werden im Jahr 2022 automatisierte Fahrfunktionen der Stufe 3 erwartet. Die Bedingungen für die Genehmigung für automatisierte Spurhalteassistenzsysteme dieser Stufe werden durch die UN-Regelung Nr. 157 vorgegeben und sehen einen Einsatz bis 60 km/h vor (UNECE (2021)). Der „Drive Pilot“ in der S-Klasse von Mercedes soll eben diese Fahrfunktion leisten. Anfang Dezember 2021 wurde dafür die Typgenehmigung durch das Kraftfahr-Bundesamt erteilt und ab Anfang 2022 soll die Fahrfunktion bestellbar sein (DER SPIEGEL (2021)). Die Betriebsbedingungen schließen Nacht, Nebel, Regen, Kälte, Baustellen und Tunnel aus und fordern eine Übernahmebereitschaft der Fahraufgabe durch die fahrende Person innerhalb von zehn Sekunden. Fahrfremde Tätigkeiten sind daher teilweise erlaubt, Schlafen jedoch nicht, was auch durch eine Kamera überprüft wird. (ADAC (2021))

Marktdurchdringung

Gemäß der Annahme, AV seien käuflich zu erwerben, stellt sich die Frage nach deren Verbreitung innerhalb der Fahrzeugflotte. Neben den Fahreigenschaften, dem Kaufpreis oder der dann vorherrschenden Altersverteilung der Fahrzeugflotte könnten auch staatliche Anreize Einfluss auf die Marktdurchdringung haben. Als Hürden für eine rasche Verbreitung von AV sehen FAGNANT UND KOCKELMAN (2015) voraussichtlich hohe Anschaffungskosten, mögliche Rechtsstreitigkeiten sowie Mängel der Fahrzeuge in den Bereichen Software-Sicherheit und Datenschutz.

KLEIN UND ALTENBURG (2019) tragen in ihrer Analyse die Aussagen einiger Quellen zu Anteilen hoch- und vollautomatisierter Fahrzeuge an Zulassungen, Bestand und Modal-Split der Fahrleistung zusammen. Abbildung 11 zeigt die prognostizierten Werte für verschiedene Zeitpunkte zwischen 2020 und 2055.

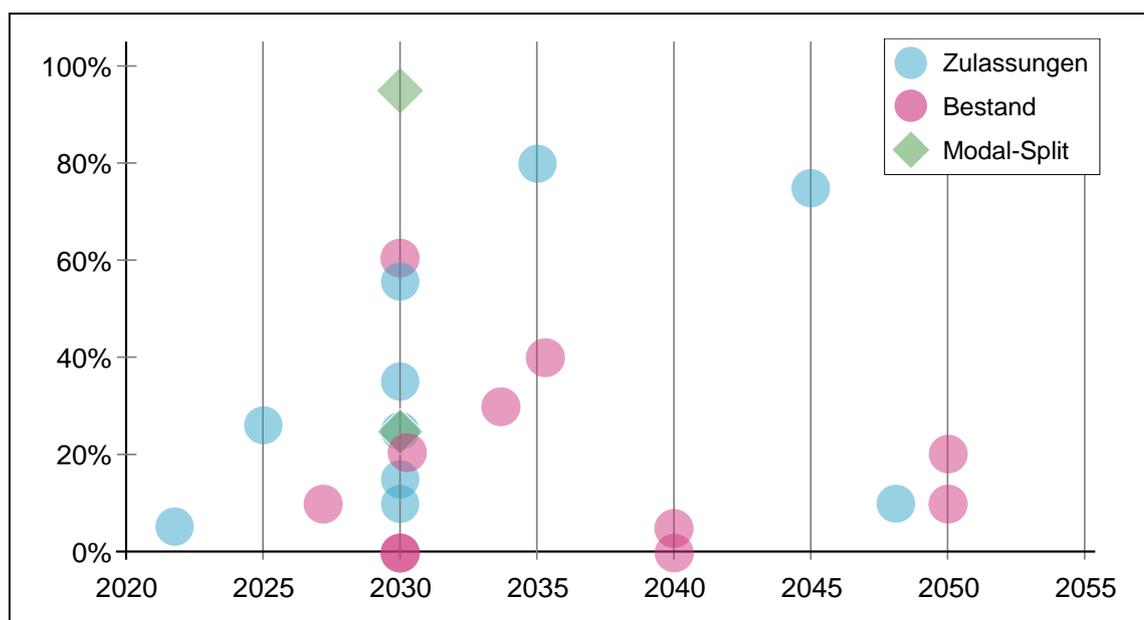


Abbildung 11: Vorhersagen für Anteile hoch- und vollautomatisierter Fahrzeuge an Zulassungen, Bestand und Modal-Split der Fahrleistung (eigene Darstellung in Anlehnung an KLEIN UND ALTENBURG (2019)).

Als Ganzes betrachtet gibt es eine große Streuung bei den Vorhersagen, auch innerhalb der einzelnen Kategorien und teilweise mit konträren Schätzungen. Die unterschiedlichen Standpunkte relativieren sich allerdings auch, wenn man bedenkt, dass die Prognosen zu verschiedenen Zeitpunkten, für unterschiedliche Kontexte (Land, Fahrzeugart und Automatisierungsstufe) und für sehr lange Zeithorizonte getätigt wurden. Nichtsdestotrotz lässt sich schlussfolgern, dass Vorhersagen zur Verbreitung automatisierter Fahrzeuge grundsätzlich mit großer Unsicherheit behaftet sind.

Einige Arbeiten versuchen modellgestützt die Ausbreitung automatisierter Fahrzeuge vorherzusagen und nutzen dabei Diffusionsmodelle. Mit diesen lässt sich der zeitliche Verlauf einer Entwicklung (Verbreitung, Wachstum) bis hin zur Sättigung schätzen.

LAVASANI ET AL. (2016) schätzen zur Prognose der Ausbreitung vollautomatisierter Fahrzeuge in den USA ein generalisiertes Bass-Diffusionsmodell. Als Input verwenden sie die Verkaufszahlen von Hybridfahrzeugen, deren Preisverhältnis zu herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen, die Technologieakzeptanz auf Basis der vergangenen Internet- und Mobiltelefonnutzung und das Bruttoinlandsprodukt pro Person. Auf Grundlage der geschätzten Modellparameter treffen sie Annahmen für weitere Berechnungen. Sollten vollautomatisierte Fahrzeuge 2025 verfügbar sein und 75 % aller Haushalte als Marktgröße herangezogen werden, ergibt sich aus dem Diffusionsmodell eine Sättigung der Verkaufszahlen im Zeitraum 2055-2060. AV stellen dann einen Anteil von 17 % der gesamten Fahrzeugflotte.

KRÖGER ET AL. (2019) machen sich ebenfalls ein Fahrzeugtechnologie-Diffusionsmodell mit S-förmigem Verlauf für die Schätzung der Neuzulassungen vollautomatisierter Fahrzeuge zunutze. Die Grundlage dafür bilden die Neuzulassungen von Fahrzeugen, die mit ACC (Adaptive Cruise Control) ausgestattet sind. Die Ausbreitung innerhalb der Fahrzeugflotte wird anhand der Neuzulassungen und mithilfe der durchschnittlichen Lebensdauer von Fahrzeugen berechnet. Sie untersuchen jeweils für die USA und für Deutschland zwei Szenarien, zwischen denen sich die Verfügbarkeit von AV gestaffelt nach Fahrzeugklassen unterscheidet. Im Trend-Szenario sind AV ab 2030-2034 und im Extrem-Szenario ab 2025-2028 käuflich zu erwerben. Unterschiedliche Annahmen für die beiden Länder betreffen die Fahrzeugklassenverteilung sowie die durchschnittliche Lebensdauer der Fahrzeuge. Es ergeben sich AV-Anteile der Flotten im Jahr 2035 von 10 % und 8 % im Trend-Szenario und 38 % sowie 29 % im Extrem-Szenario jeweils für Deutschland und die USA.

KRAIL ET AL. (2019) nehmen auch eine Einteilung in Fahrzeugklassen vor und berücksichtigen Aufpreise für Fahrfunktionen aller Automatisierungsstufen inklusive zeitlicher Preisdegression, die sie aus den Produktionskosten schätzen. Die Akzeptanz gegenüber AV und daraus abgeleitet die Mehrpreisbereitschaft leiten sie aus anderen Studien ab. Die Markteinführung pro Stufe und Fahrzeugklasse wird in Zweijahresintervallen angenommen, wobei mit hochautomatisierten Fahrzeugen (Stufe 4) ab 2026 und mit vollautomatisierten Fahrzeugen (Stufe 5) ab 2036 gerechnet wird. Die Diffusionsmodellierung von AV erfolgt durch Abgleich der Mehrpreisbereitschaften mit den tatsächlich zu

erwartenden Aufpreisen je Automatisierungsstufe. In Summe ergeben sich Anteile von hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen am Fahrzeugbestand von 34 % für 2050.

Akzeptanz und Zahlungsbereitschaft

Es gibt eine große Anzahl Studien, die die allgemeine Akzeptanz gegenüber AV oder Zahlungsbereitschaften für AV oder automatisierte Fahrfunktionen in verschiedenen Kontexten untersucht. In der Regel werden die Neigungen der Befragten gegenüber AV dabei auf den Zusammenhang mit deren soziodemografischen Eigenschaften, dem aktuellen Verhalten, Fahrteigenschaften oder Haltungen zu anderen Themen untersucht. Zunächst werden zwei Beiträge kurz vorgestellt, danach folgen die zusammengefassten Erkenntnisse aus zwei Metaanalysen.

ASGARI UND JIN (2019) führen eine kombinierte Revealed- und Stated-Preference-Befragung mit ca. 1.200 Personen aus den USA durch, in der u. a. die Erwartung, in zehn Jahren AV zu nutzen sowie die Zahlungsbereitschaft für automatisierte Fahrfunktionen abgefragt werden. Ihren Ergebnissen zufolge sind Personen unter 30 Jahren, mit hohem Einkommen oder ohne Fahrerlaubnis eher geneigt, vollautomatisierte Fahrzeuge zu nutzen. Dasselbe gilt für technologieaffine Personen, umgekehrt ist es für Fahrfreudige. Für eine Teilautomatisierung sind 10 % der Befragten bereit, 4.000 \$ oder mehr zu bezahlen, für eine Vollautomatisierung des Fahrzeugs 20 %. Befragte, die als sensitiv gegenüber der Wahl des Verkehrsmodus kategorisiert werden, zeigen eine höhere Zahlungsbereitschaft, da sie AV einen höheren Nutzen in Form von Komfort und anderer Zeitnutzung zuschreiben. Dies ist auch für Personen, die als grundsätzlich misstrauischer gelten, der Fall. ASGARI UND JIN (2019) begründen dies damit, dass AV als sicherer mit mehr Privatsphäre wahrgenommen werden als Verkehrsmittel des ÖV.

BANSAL UND KOCKELMAN (2018) führen eine Befragung von 1.000 Personen aus Texas durch. Für die Gruppen der Menschen mit Behinderung, Bachelor-Abschluss, Carsharing-Nutzer, Vielreisende und mehrere Erwerbstätige in einem Haushalt identifizieren sie ein größeres Interesse, AV zu nutzen. Die Befragten sind dazu bereit, durchschnittlich 4.600 \$ für bedingt automatisierte (Stufe 3) und 7.600 \$ für hochautomatisierte Fahrfunktionen auszugeben. Ältere Personen zeigen dabei eine geringere Zahlungsbereitschaft und Menschen, die höheren Einkommensschichten zuzuordnen sind oder schon einen Unfall hatten, würden mehr dafür ausgeben.

BECKER UND AXHAUSEN (2017) untersuchen in ihrer Metaanalyse 16 Beiträge aus Fachzeitschriften oder Konferenzen sowie Forschungsberichte. Die Ziele und Perspektiven der Studien weisen eine große Bandbreite auf. Den Befragten gegenüber werden AV teilweise ausschließlich im Kontext geteilter, vollautomatisierter Fahrzeugflotten, teilweise als Privatfahrzeuge einer oder mehrerer verfügbarer Automatisierungsstufen vorgestellt. Das generelle Interesse, AV zu nutzen und zugehörige Zahlungsbereitschaften variieren stark und werden daher nicht erwähnt. Zusammenhänge, die jeweils von einem großen Teil der untersuchten Studien gefunden wurden, sind im Folgenden aufgeführt.

- Soziodemographisch:
 - Männer sind eher dazu geneigt, AV zu nutzen, als Frauen,
 - Jüngere sind eher dazu geneigt, AV zu nutzen, als Ältere,
 - Ein hohes Einkommen korreliert mit höherer Zahlungsbereitschaft.
- Haltung: Ein ausgeprägtes Technologiebewusstsein geht mit einem größeren Interesse, AV zu nutzen und einer tendenziell früheren Nutzung einher.
- Aktuelles Verhalten: Erfahrungen mit neueren Fahrzeugen mit Fahrassistentenfunktionen wirken sich positiv auf die Nutzungs- und Zahlungsbereitschaft bezüglich AV aus.
- Umfeld der Fahrt: Personen mit Wohnort in urbanem Umfeld oder Gebiet mit hoher Einwohnerdichte sind eher geneigt, vollautomatisierte Fahrzeuge zu nutzen.

Für einen Review von über 40 Beiträgen, der sich hauptsächlich auf die Methodik und weniger auf quantitative Ergebnisse anderer Arbeiten konzentriert, sei auf GKARTZONIKAS UND GKRTZA (2019) verwiesen. Sie vergleichen das Ziel der Studien, klassifizieren die untersuchten Komponenten und deren qualitativen Einfluss auf die Absicht, AV zu nutzen, und fassen potenzielle Vorteile, Hürden, Sorgen und Chancen bezüglich der Einführung von AV zusammen. Als positiv für die Bereitschaft, automatisierte Fahrfunktionen zu nutzen, identifizieren GKARTZONIKAS UND GKRTZA (2019) die allgemeine Kenntnis über AV, das Interesse an Innovationen, die erwartete AV-Funktionalität und die Abenteuerlust. Sicherheitsbedenken hingegen korrelieren negativ mit dem Interesse an der Nutzung von automatisierten Fahrfunktionen.

3.3 Potenzielle Wirkungen automatisierter Fahrzeuge

Dieses Kapitel befasst sich mit den möglichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge auf verschiedene Bereiche, die im Zusammenhang mit Mobilität und Verkehr stehen. Für Beiträge zu Recht und Haftung, sowie zur Thematik des Zusammenspiels von Mensch und Maschine sei auf MAURER ET AL. (2015) verwiesen. Auch auf die Ethik wird dort Bezug genommen. Hierzu sei explizit auch der Bericht der Ethik-Kommission „Automatisiertes und Vernetztes Fahren“ erwähnt (BMVI (2017)), der mit Fokus auf Fahrzeuge der Automatisierungsstufen 4 und 5 zwanzig ethische Regeln für den Fahrzeugverkehr aufstellt und diskutiert.

Die einzelnen Unterkapitel sollen jeweils einen Überblick über die Erkenntnisse aus Forschung und Literatur geben. Der Fokus liegt dabei auf den Themengebieten Verkehrsfluss und Kapazität, Zeitwahrnehmung sowie Mobilitätsverhalten und Nachfrage, da diese eine große Relevanz für diese Arbeit haben. Aus demselben Grund sollen AV ausschließlich im Kontext der Privatfahrzeuge betrachtet werden. Im Rahmen der Privatfahrzeuge wird das Kürzel AV in den folgenden Teilen dieser Arbeit synonym für automatisierte Pkw verwendet.

Es gibt eine Vielzahl an Studien, die sich mit den Auswirkungen vollautomatisierter Fahrzeugflotten als Mobilitätsdienstleistung auseinandersetzen. Dabei ersetzen fahrerlose

SAV (shared automated vehicles) entweder einen bestimmten Teil oder sogar die gesamte Flotte privater Autos oder sind als zusätzlicher Verkehrsmodus verfügbar. Mit dem Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen wird dann versucht, die erforderliche Größe der SAV-Flotte, die Fahrleistung der Fahrzeuge, die Qualität des Dienstes oder die Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage abzuschätzen. Für umfassende Reviews zu Veröffentlichungen in diesem Gebiet wird auf PERNESTÅL UND KRISTOFFERSSON (2018) und NARAYANAN ET AL. (2020) verwiesen. Ferner geben SOTEROPOULOS ET AL. (2019) einen guten Überblick über Modellierungsstudien, die sich mit den Auswirkungen von AV beschäftigen, darunter insbesondere auch Studien zu SAV-Flotten.

3.3.1 Verkehrsfluss und Kapazität

Eine Erwartung an automatisierte Fahrzeuge ist, dass sie die Effizienz des Verkehrsablaufs steigern und die Kapazität besser als konventionelle Fahrzeuge nutzen (FGSV (2020b)). Realisieren könnten AV dies durch das Fahren mit geringeren Fahrzeugfolgeabständen, konstanteren Geschwindigkeiten und kooperativem Verhalten (FAGNANT UND KOCKELMAN (2015)). Damit könnten sich auch schon im Mischverkehr harmonisierende Effekte auf den Verkehrsablauf einstellen (FGSV (2020b)).

Auf der anderen Seite wird befürchtet, dass sich die Unterschiede im Fahrverhalten von AV und CV negativ auf den Verkehrsablauf auswirken. Beispielsweise können automatisierte Fahrzeugpuls mit geringen Abständen eine Barrierewirkung auf mehrstreifigen Fahrbahnen haben und Fahrstreifenwechsel generell und insbesondere für Auf- und Ausfahren anderer Fahrzeuge behindern (FGSV (2020b)). Eine zusätzliche Unsicherheit kommt durch die herstellereigene Programmierung zustande, die das Fahrverhalten von AV bestimmen dürfte (FGSV (2020b)).

Um die Wirkungen von AV vor deren Verfügbarkeit auf den Verkehrsablauf abschätzen zu können, verwenden viele Studien mikroskopische Verkehrsflussmodelle mit unterschiedlichen Schwerpunkten und Annahmen. Dabei betreffen die Annahmen zum Fahrverhalten von AV stets das Fahrzeugfolge- und manchmal auch noch das Fahrstreifenwechselverhalten.

Als Maß für Änderungen im Verkehrsablauf wird, sofern quantitative Änderungen bestimmt werden, meist die Änderung der Kapazität der untersuchten Verkehrsinfrastruktur angegeben. Veränderte Kapazitäten können den Definitionen aus Kapitel 2.1.1 entsprechend auch als gesteigerte Leistungsfähigkeit der Fahrer-Fahrzeugpopulation interpretiert werden. Da der Begriff der Leistungsfähigkeit in der Literatur sehr selten gebraucht wird, wird in diesem Abschnitt ebenfalls darauf verzichtet.

Es folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse einer Auswahl von Studien aus der Literatur. Diese sind nach dem Erscheinungsjahr sortiert und werden, je nach untersuchter Infrastruktur der Studie, dem Abschnitt Freie Strecke oder (Signalisierte) Knotenpunkte zugeordnet.

Eine Literaturanalyse, die sich weniger auf konkrete Annahmen und Ergebnisse fokussiert, sondern eher auf die Modellierungstheorie im Zusammenhang mit AV, ist in YU ET AL. (2021) zu finden. Sie unterscheiden auch zwischen mikroskopischen, mesoskopischen und makroskopischen Modellen und analysieren den zukünftigen Forschungsbedarf. Den Stand der Technik zur mikroskopischen Modellierung von AV stellen GORA ET AL. (2020) dar.

Freie Strecke

Bei freien Strecken handelt es sich nach straßenrechtlicher Definition um Straßenabschnitte außerhalb von Ortsdurchfahrten (FGSV (2020a)). Diese können auch planfreie oder teilplanfreie Knotenpunkte einschließen. Die meisten Studien konzentrieren sich dabei explizit auf Autobahnen oder Straßen, die autobahnähnlich ausgebaut sind. Dabei werden häufig die Fahrfunktionen ACC oder CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control) als repräsentativ für das longitudinale Fahrverhalten von AV im Modell abgebildet.

VAN AREM ET AL. (2006) untersuchen in einem mikroskopischen Simulationsmodell die Wirkung von Fahrzeugen, die mit CACC ausgestattet sind, auf den Verkehrsfluss auf einem Autobahnabschnitt mit Fahrstreifenreduzierung. Die Folgezeitlücke beträgt für herkömmliche Fahrzeuge 1,4 s und für Fahrzeuge mit CACC 0,5 s. Während für eine CACC-Ausstattung von weniger als 40 % der Fahrzeugflotte keine nennenswerten Änderungen zu beobachten sind, wirken sich höhere Anteile geringfügig positiv auf die Kapazität aus. Der Hauptvorteil schlägt sich bei hohen Verkehrsstärken nieder und zeigt eine deutliche Verbesserung der Stabilität des Verkehrsflusses: Die Anzahl der Schockwellen sinkt um ca. 90 %. VAN AREM ET AL. (2006) stellen außerdem fest, dass sich eine laterale Kooperation der CACC-Fahrzeuge als wichtig für die Fahrstreifenwechsel anderer Fahrzeuge erweist: Herkömmliche Fahrzeuge haben sonst durch die Präsenz von dichten Fahrzeugpulks Schwierigkeiten, Lücken zu finden.

TIENTRAKOOL ET AL. (2011) unterscheiden zwischen herkömmlichen Fahrzeugen, Fahrzeugen mit Assistenzfunktion und solchen mit zusätzlicher Kommunikationsfunktion. Die Assistenzfunktion fährt dabei stets mit dem kürzest möglichen Abstand zum Vorderfahrzeug, für den eine Kollision noch vermieden werden kann. Dieser Abstand hängt von Reaktionszeit und maximaler Bremsverzögerung ab. Für hintereinander herfahrende Fahrzeuge mit Kommunikationsfunktion werden sehr geringe Abstände angenommen. Es muss lediglich die technische Verzögerung von Erkennung einer notwendigen Bremsung des vorderen Fahrzeugs bis zur Übertragung des Bremsbefehls zum hinteren Fahrzeug berücksichtigt werden. TIENTRAKOOL ET AL. (2011) bestimmen für verschiedene Durchdringungsgrade der Fahrzeugtypen die durchschnittlichen Folgeabstände. Sie ermitteln aus dem Zusammenhang von Kapazität, Dichte und Geschwindigkeit die theoretisch möglichen Kapazitätswerte für Autobahnen ohne Auf- und Ausfahrten sowie Verflechtungsbereiche. Für einen Anteil von jeweils 100 % ergeben sich Kapazitätsgewinne von 43 % für Fahrzeuge mit Assistenzfunktion und von 273 % für jene mit Kommunikationsfunktion. Bei letzterem Fall halten die Fahrzeuge einen durchschnittlichen Abstand von ungefähr fünf Metern.

SHLADOVER ET AL. (2012) untersuchen den Effekt von Fahrzeugen mit ACC und CACC auf die Kapazität von Autobahnen mittels mikroskopischer Simulationen. Die vorgegebenen Zeitlücken für die Fahrfunktionen basieren dabei auf gesammelten Daten zu Zeitlücken, die von Testern für diese Ausstattungen eingehalten wurden. Eine Ausstattung von Fahrzeugen mit ACC im Modell bringt keine signifikanten Änderungen mit sich. Konnektivität der Fahrzeuge kann die Kapazität auf Autobahnen um bis zu 100 % erhöhen. SHLADOVER ET AL. (2012) bringen eine Kommunikationsausstattung ins Gespräch, mit denen man CV nachrüsten könnte, sodass diese als Führungsfahrzeug für andere CACC-Fahrzeuge fungieren könnten. Dies könnte die positiven Effekte auf die Kapazität verstärken.

FRIEDRICH (2015) ermittelt mithilfe fundamentaler, makroskopischer Zusammenhänge Kapazitätsänderungen in Abhängigkeit von Geschwindigkeit, Lkw-Anteil und AV-Anteil für Autobahnen. Aus den Größen Fahrzeuglänge, Folgezeitlücke und Geschwindigkeit kann die Dichte berechnet werden. Mit Kenntnis über Dichte und Geschwindigkeit ergibt sich die Kapazität. Änderungen durch AV werden durch die Annahme bestimmter Zeitlücken eingeführt, die sich je nach Folgefall unterscheiden:

- AV folgt AV mit einer Folgezeitlücke von 0,5 s,
- AV folgt CV mit einer Folgezeitlücke von 0,9 s, um die fahrende Person nicht zu bedrängen,
- CV folgt beliebigem Fahrzeugtyp mit einer Folgezeitlücke von 1,15 s.

Mit steigendem AV-Anteil ist der Kapazitätsgewinn überproportional. Es kommt zu einer Steigerung der Kapazität von knapp 20 % für 50 % AV und von ungefähr 80 % bei 100 % AV für reinen Pkw-Verkehr.

KRAUSE ET AL. (2017) untersuchen die Auswirkungen verschiedener Automatisierungsgrade von Fahrzeugen auf den Verkehrsfluss durch Simulation verschiedener Autobahnabschnittelemente. Sie beobachten positive Effekte hauptsächlich für vernetzte AV, da diese kleinere Folgezeitlücken (0,9 s) als nichtvernetzte AV (1,8 s) einhalten. Mit nichtvernetzten AV sind geringe Kapazitätsminderungen zu erwarten. Dennoch kann durch eine Harmonisierung der Geschwindigkeiten eine Reduzierung von Verkehrszusammenbrüchen erreicht werden. Für vernetzte AV sind ab einem Anteil von über 50 % vorteilhafte Effekte zu verzeichnen. Die Kapazitätsgewinne auf Autobahnabschnitten betragen bei Vollausstattung im Mittel 30 %.

CALVERT ET AL. (2017) setzen bei ihrem mikroskopischen Simulationsexperiment eines Autobahnabschnitts mit Auffahrt ein empirisch kalibriertes Fahrzeugfolgemodell ein. Damit bilden sie die Funktionsweise von ACC echter Fahrzeuge nach. Ihre Ergebnisse zeigen, dass für niedrige Durchdringungsraten geringfügige, negative Effekte auf den Verkehrsfluss zu erwarten sind. Eine Steigerung der Kapazität und Reduktion der Reisezeit treten für AV-Anteile von über 70 % auf.

DELIS ET AL. (2018) erweitern ein makroskopisches, gas-kinetisches Flussmodell, um die Wirkungen von Fahrzeugen mit ACC und CACC zu untersuchen. Das für CV kalibrierte Modell umfasst einen dreistreifigen, häufig überlasteten Autobahnabschnitt in

Großbritannien. Mit ACC ausgestattete Fahrzeuge verringern die Staulänge, können aber auch bei hohen Anteilen Stau nicht gänzlich verhindern. Für niedrige Anteile an CACC-Fahrzeugen stellen DELIS ET AL. (2018) eine verlangsamte Stauausbreitung fest, für höhere Anteile entsteht gar kein Stau.

ADEBISI ET AL. (2020) leiten aus Daten von mikroskopischen Simulationen mit AV Kapazitätsänderungen für standardisierte Autobahnsegmente ab. Sie betrachten dabei Fahrfunktionen in verschiedenen Varianten, die sich hinsichtlich des Folgezeitlücke von CACC (0,6 s bis 1,1 s) und der Verfügbarkeit kooperativen Fahrstreifenwechselverhaltens unterscheiden. Die Auswertung der Simulationsdaten ergibt mögliche Kapazitätssteigerungen im Bereich von ungefähr 40 %. Die Störungen durch auffahrende Fahrzeuge bei entsprechenden Autobahnsegmenten können durch kooperatives Fahrstreifenwechselverhalten gemindert werden, für Verflechtungsbereiche sind keine nennenswerten Vorteile zu verzeichnen.

Einige der vorgestellten Studien beobachten positive Auswirkungen automatisierter Fahrfunktionen auf den Verkehrsablauf in relevantem Ausmaß erst bei höheren AV-Anteilen (VAN AREM ET AL. (2006), KRAUSE ET AL. (2017), CALVERT ET AL. (2017)). Andere Studien stellen fest, dass Kapazitätsgewinne überproportional zum AV-Anteil ansteigen (TIENTRAKOOL ET AL. (2011), SHLADOVER ET AL. (2012), FRIEDRICH (2015), ADEBISI ET AL. (2020)). Im Gegensatz dazu zeigen STERN ET AL. (2018) durch Erkenntnisse eines realen Experiments, dass auch wenige AV den Verkehrsfluss in bestimmten Verkehrssituationen wie Stop-and-Go-Wellen harmonisieren und stabilisieren könnten. Sie schlussfolgern, dass sich der Verkehrsfluss bereits durch die aktive Steuerung von weniger als 5 % der Fahrzeugflotte kontrollieren lassen würde (STERN ET AL. (2018)).

(Signalisierte) Knotenpunkte

In diesem Abschnitt wird der Begriff Knotenpunkt synonym zu plangleichen Knotenpunkten verwendet. Nicht inbegriffen sind planfreie oder teilplanfreie Knotenpunkte wie Auf- und Ausfahrten oder Verflechtungsbereiche auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen.

Auch wenn die heutige Infrastruktur an Knotenpunkten bestehen bleiben würde, ist es FAGNANT UND KOCKELMAN (2015) zufolge denkbar, dass die Fahrweise von AV positive Effekte auf den Verkehrsablauf an Knotenpunkten hat. Durch kürzere Anfahrzeiten und kleinere Abstände zwischen den Fahrzeugen könnten AV die verfügbare Freigabezeit an Lichtsignalanlagen (LSA) effektiver nutzen und somit die Kapazität erhöhen (FAGNANT UND KOCKELMAN (2015)).

FRIEDRICH (2015) betrachtet neben der freien Strecke auch die Situation an signalisierten Knotenpunkten. Unter der Annahme der halben Reaktionszeit von AV im Vergleich zu CV (0,3 s statt 0,6 s) ermittelt er für 100 % AV und eine unveränderte Räumgeschwindigkeit eine Kapazitätssteigerung von 40 %.

WAGNER (2015) untersucht ebenfalls die Situation des Anfahrens an LSA. Halten AV Zeitlücken von 0,5 s und CV Zeitlücken von 1,5 s ein, ergibt sich in der Simulation

ungefähr eine Verdoppelung der Kapazität im Fall von 100 % AV. Generell stellt er spürbare Auswirkungen nur bei großer Verkehrsnachfrage fest, betont aber auch, dass Kapazitätsgewinne besonders dann wichtig sind.

Mit dem Wissen, dass sich in einem Pkw mitfahrende Personen schon bei geringeren Beschleunigungen unwohler fühlt als die fahrende Person, verfolgen LE VINE ET AL. (2015) einen ganz anderen Ansatz. Sie gehen davon aus, dass Personen, die die Fahraufgabe abgeben, einen gewissen Fahrkomfort erwarten. Daher werden für ein Simulationsexperiment die maximalen Beschleunigungs- und Verzögerungswerte von Pkw auf die Werte gesetzt, mit denen Schienenfahrzeugen des ÖV fahren. Diese Werte sind geringer als übliche Beschleunigungen oder Verzögerungen von Pkw. Erwartungsgemäß kommt es zu einer Verringerung der Kapazität von Knotenpunkten und zu größeren Verlustzeiten. Ob es sich dabei um signalisierte oder vorfahrtsregelte Knotenpunkte handelt bleibt offen. LE VINE ET AL. (2015) weisen darauf hin, dass empirische Daten zu den tatsächlichen Präferenzen von AV-Passagieren bisher jedoch fehlen.

Fazit

In den letzten Jahren sind viele Veröffentlichungen erschienen, die in Experimenten den Einfluss von AV auf den Verkehrsablauf untersuchen. Das Mittel der Wahl ist häufig eine mikroskopische Verkehrsflusssimulation. Beispiele für makroskopische Herangehensweisen sind in TIENTRAKOOL ET AL. (2011), FRIEDRICH (2015) und DELIS ET AL. (2018) zu finden.

Die qualitative Einordnung der Studienergebnisse zeigt, dass sich eine kooperative, automatisierte Fahrfunktionalität auf der freien Strecke stets positiv auf den Verkehrsablauf auswirkt (VAN AREM ET AL. (2006), TIENTRAKOOL ET AL. (2011), SHLADOVER ET AL. (2012), KRAUSE ET AL. (2017), DELIS ET AL. (2018), ADEBISI ET AL. (2020)). Für automatisierte Fahrfunktionen, die kein kooperatives Verhalten unterstützen, stimmen die Tendenzen nicht überein. Ein Teil der Untersuchungen ermittelt ebenfalls positive Effekte auf den Verkehrsfluss auf der freien Strecke (TIENTRAKOOL ET AL. (2011), CALVERT ET AL. (2017) für hohe AV-Anteile, DELIS ET AL. (2018)). Dem gegenüber stehen Studien, die keine nennenswerten oder gar negativen Auswirkungen beobachten (SHLADOVER ET AL. (2012), CALVERT ET AL. (2017) für niedrige AV-Anteile, KRAUSE ET AL. (2017)). Lediglich FRIEDRICH (2015) erläutert nicht explizit, ob er für sein Experiment annimmt, dass AV kommunizieren und nur deswegen die angenommene Zeitlücke einhalten können.

Für den Einfluss von AV auf den Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten nehmen FRIEDRICH (2015) und WAGNER (2015) kürzere Reaktionszeiten bzw. Zeitlücken zum Vorderfahrzeug an. Dies führt in beiden Fällen zu einer Kapazitätssteigerung des Knotenpunktes. Ob und wie der Fahrkomfort für Fahrzeuginsassen berücksichtigt werden soll, spielt von allen vorgestellten Untersuchungen nur bei LE VINE ET AL. (2015) eine Rolle: Um das Unwohlsein der Mitfahrenden zu verhindern, werden AV nicht so stark beschleunigen oder bremsen, wie menschliche Fahrende es üblicherweise tun. Dies führt zu einer Verringerung der Kapazität von Knotenpunkten.

Die Studien treffen für ihre Untersuchungen viele Annahmen. Diese beziehen sich auf:

- die untersuchte Straßenanlage (einfacher Autobahnabschnitt oder Autobahnabschnitt mit Knotenpunkten oder Fahrstreifenreduzierung),
- die betrachtete Dimension des automatisierten Fahrverhaltens (nur longitudinal oder auch lateral),
- das Umsetzen des jeweiligen Fahrverhaltens (Fahrzeugkommunikation und damit Fahrzeugkooperation möglich oder nicht; nur Änderung des Parameters für Folgeabstände oder Implementierung einer vollständigen Steuerungslogik),
- konkrete Werte, die das Fahrverhalten unmittelbar beeinflussen (Folgeabstände für alle Fahrzeugtypen oder alle Vorderfahrzeugtyp-Folgefahzeugtyp-Kombinationen, (maximale) Bremsverzögerungen).

Nichtsdestotrotz stimmen die vorgestellten Studien in der Annahme überein, dass sich AV mit ihrem spezifischen Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselverhalten auf den Verkehrsfluss auswirken und die Kapazität von Straßenanlagen beeinflussen. Diese Effekte, die von den Eigenschaften und dem Anteil der AV abhängen, müssen in Fahrzeitermittlungsverfahren nachgebildet werden.

3.3.2 Verkehrssicherheit

Menschliches Versagen ist laut Unfalldatenforschung die Hauptursache von Verkehrsunfällen (WINKLE (2015)). Daher wird dem automatisierten Fahren ein großes Potenzial zur Erhöhung der Verkehrssicherheit zugeschrieben. Es wird erwartet, dass AV alle Verkehrsregeln einhalten und kein menschliches Fehlverhalten durch den Einfluss von Drogen, Ablenkung, Müdigkeit oder Unaufmerksamkeit aufweisen (FAGNANT UND KOCKELMAN (2015)).

Auf der anderen Seite argumentiert beispielsweise die FGSV (2020b), dass die Verkehrssicherheit sinken könnte, weil es unklar ist, ob das Fahrverhalten im Mischverkehr von CV und AV gegenseitig korrekt eingeschätzt werden kann. Des Weiteren können durch die noch unbekannteste Fahrweise von AV Fußgänger und Radfahrer verunsichert werden. Auch eine Provokation von Vollbremsungen von AV durch andere Verkehrsteilnehmer ist vorstellbar. (FGSV (2020b))

WINKLE (2015) prognostiziert, dass es in einer Zukunft mit AV vermutlich auch mehr Unfälle durch technisches Versagen geben wird. Eine Vorhersage zu den Wirkungen von hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen auf die Verkehrssicherheit ist ihm zufolge zum damaligen Stand nicht möglich, da dafür Daten zu den Funktionsausprägungen und den Systemgrenzen der AV fehlen. Daher versucht WINKLE (2015) die Sicherheitspotenziale für Fahrzeuge mit Funktionen des assistierten und teilautomatisierten Fahrens, die schon verfügbar sind (z. B. Notbremsassistent, Nachtsichtassistent, Fahrstreifenwechselassistent), zu ermitteln. Seine Untersuchung zeigt relevante Vorteile (je nach Fahrfunktion bis ca. 70 % Unfallreduktion), die allerdings aufgrund geringer Stichproben

ausführlich erhobener Unfalldaten und einer großen Bandbreite der ermittelten Wirkungen nicht statistisch belastbar sind.

Die Schwierigkeit einer Prognose zu den Sicherheitspotenzialen von AV wird im Bericht der OECD (2018) ebenfalls betont. Die Begründung ist, dass ein AV schließlich ein kombiniertes Hardware- und Softwaresystem ist, dessen sicherheitskritische Leistungsmerkmale sich durch Software-Upgrades radikal ändern können. Die Wichtigkeit von Cybersecurity bezüglich der Konnektivität bei vernetzten Fahrzeugen wird ebenfalls diskutiert. Diesen Zusammenhang betreffend, scheint es immer noch unklar zu sein, auf welches Sicherheitsparadigma sich die Fahrzeugautomatisierung konzentrieren soll: Entweder verlassen sich die Fahrzeuge ausschließlich auf ihre eigenen Fähigkeiten, oder sie sind in ein kommunikatives Netz eingebettet und setzen sich damit den zusätzlichen Risiken fehlerhafter oder gefälschter Signale oder Mitteilungen aus. (OECD (2018))

Im Bericht der OECD (2018) wird außerdem angeführt, dass das Übernehmen der Fahraufgabe von ADS, dem automatisierten Fahrsystem, durch den Menschen eine gefährliche Situation ist, die generell und besonders in sicherheitskritischen Momenten vermieden werden sollte. Die Risiken sind zum einen, dass ADS nur einfachere Fahrumgebungen und -situationen übernehmen, um die Fahraufgabe ausgerechnet in schwierigeren Situationen an den Menschen abzugeben. Zum anderen würden Menschen durch Abgewöhnung vom selbstständigen Fahren ohnehin immer untrainierter und weniger leistungsfähig, müssten dann aber trotzdem in der Lage sein, die Fahrsituationen, die für das ADS nicht machbar oder außerhalb der Systemgrenze sind, zu absolvieren. Als hilfreicher Indikator der Sicherheitsperformance für die Zukunft wird daher neben der Unfallhäufigkeit die Anzahl der Übergaben von ADS an den Menschen empfohlen. (OECD (2018))

RÖSENER ET AL. (2019) untersuchen fünf Fahrfunktionen der Automatisierungsstufen 3 und 4 auf ihr Potenzial zur Unfallreduktion. Diese Fahrfunktionen unterscheiden sich in ihren Systemgrenzen (Ortslage, Straßenklasse, Geschwindigkeitsbereich) und der Funktionalität (Fahrstreifenwechsel, Ein- und Abbiegevorgänge, Wenden) an sich. Für vier der fünf Fahrfunktionen werden Situationen mit starkem Niederschlag oder Nebel, bei Glätteis und in Baustellen ausgeschlossen. Die Unfälle aus nationalen Datenbanken werden kategorisiert und den Fahrfunktionen zugeordnet. Je nach Funktion können 56-65 % der Unfälle grundsätzlich adressiert werden. Es folgt das simulationsgestützte Bestimmen der Auftretenshäufigkeiten verschiedener Unfallszenarien und der Abgleich, ob ein Unfallszenario innerhalb der System- und Funktionalitätsgrenzen liegt. Die Hochrechnung auf das Unfallgeschehen von Deutschland ergibt, dass je nach Fahrfunktion 46-54 % der Unfälle mit Personenschäden bei einer vollständigen Durchdringung der Fahrzeugflotte mit der jeweiligen Funktion vermieden werden können. Zusätzliche Unfallursachen aufgrund technischer Ausfälle werden vernachlässigt. (RÖSENER ET AL. (2019))

LITMAN (2021b) fasst neuartige Ursachen im Zusammenhang mit AV, die zu einem niedrigeren Sicherheitsniveau bzw. mehr Unfällen führen können, zusammen und nennt Hardware- und Softwarefehler, böswillige Hackerangriffe, erhöhte Risikobereitschaft,

höhere Unfallschwere durch geringe Abstände bei Platooning, erhöhte Gesamtfahrleistung und zusätzliche Risiken für Nicht-Pkw-Reisende durch fehlerhafte Erkennung durch AV.

3.3.3 Zeitwahrnehmung

Die Wahrnehmung der Zeit bei Ortsveränderungen spielt für den Nutzen, den Menschen damit verbinden, eine wichtige Rolle. Für die Bestimmung des Nutzens, den Reisende einer Ortsveränderung zuweisen, werden sämtliche Verkehrsaufwände in dieselbe Einheit umgerechnet. Dafür wird, wie schon in Kapitel 2.4 erörtert, der Zeitwert herangezogen. Die Kenntnis darüber ist für die Verkehrsnachfragemodellierung höchst relevant.

Wenn Personen nicht mehr selbst die Fahraufgabe übernehmen müssen, sondern sich anderen Tätigkeiten zuwenden können, wird dies Auswirkungen auf ihre Wahrnehmung der Fahrzeit, und damit ihren Zeitwert, haben. Sie können die Zeit dann produktiver nutzen (FAGNANT UND KOCKELMAN (2015)). Viele Studien untersuchen diesen Zusammenhang mithilfe von Befragungen. Eine Auswahl solcher Studien mit Schwerpunkt auf deren Ergebnissen wird im Folgenden vorgestellt. Eine ausführlichere Literaturlanalyse ist in KOLAROVA ET AL. (2019a) zu finden.

Als erstes Beispiel dient eine Befragung unter 26.000 britischen Bahnreisenden durch LYONS ET AL. (2007), die zwar noch keinen direkten Bezug zu AV hat, jedoch zeigt, dass die Befragten der Fahrzeit einen positiven Nutzen zuschreiben: 78 % geben an, die Zeit teilweise oder vollständig lohnenswert genutzt zu haben. Die am meisten durchgeführten Aktivitäten sind nach Häufigkeit der Angabe sortiert: Lesen, Entspannen bzw. den Blick schweifen lassen, Arbeiten bzw. Lernen und sich unterhalten. Der Anteil der Fahrzeit, der für produktive Tätigkeiten aufgewendet wird, ist für Dienstreisen höher als bei Pendel- oder Freizeitfahrten und steigt mit der Fahrtdauer.

CYGANSKI ET AL. (2015) führen eine Online-Umfrage mit 1.000 Teilnehmenden zu deren aktueller und zukünftiger Reisezeitnutzung durch. Der Fokus liegt dabei auf vollautomatisiertem Fahren und dem Zusammenhang zur aktuellen Zeitwerteinschätzung im ÖV. Sie bestätigen größtenteils die Ergebnisse von LYONS ET AL. (2007) bezüglich der Aktivitäten von ÖV-Reisenden und identifizieren Landschaft genießen, sich unterhalten, Musik hören, lesen und entspannen als die beliebtesten Aktivitäten. Der einzige Unterschied ist das Fehlen der Aktivität Arbeiten. CYGANSKI ET AL. (2015) argumentieren, dass das nicht nur darauf zurückzuführen ist, dass die Menschen ihre Zeit auf Reisen nicht mit Arbeiten verbringen möchten, sondern auch darauf, dass es verschiedene Berufe gibt, bei denen arbeitsbezogene Tätigkeiten unterwegs nicht ausgeführt werden können. Ihre Auswertung zeigt, dass Personen, die auch heute schon auf ihren Bahnreisen arbeiten, dies auch in AV tun wollen. Analog präferieren Personen, die die Fahrzeit nicht zum Arbeiten nutzen, auch zukünftig in AV andere Aktivitäten.

Studien, die Stated-Preference-Befragungen nutzen (LOOFF ET AL. (2018), CORREIA ET AL. (2019)) und Befragungen, die Revealed- und Stated-Preference kombinieren (STECK ET AL. (2018), KOLAROVA ET AL. (2019b)), ermitteln für Pendelfahrten mit AV Reduktionen des Zeitwerts zwischen 10 % und 41 % im Vergleich zu entsprechenden Fahrten mit CV. Für (kurze) Freizeit- und Einkaufsfahrten ergeben sich laut STECK ET AL. (2018), CORREIA ET AL. (2019) und KOLAROVA ET AL. (2019b) geringe oder keine relevanten Veränderungen.

LOOFF ET AL. (2018) unterscheiden in ihrer Befragung zwischen der Inneneinrichtung von AV, die sich einmal am Arbeiten und einmal an Freizeitaktivitäten orientiert. Eine positive Auswirkung auf die Zeitwahrnehmung ist nur für Erstere zu beobachten, für eine freizeitorientierte Ausstattung weisen sie sogar höhere Zeitwerte als für CV aus. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass sich die Befragung ausschließlich auf Pendelfahrten konzentriert hat.

FLÜGEL ET AL. (2019) ermitteln den Zeitwert für Fahrten in AV mithilfe von Routenwahl-experimenten, bei denen Befragte eine von zwei Routen auswählen. Der Modus ist dabei stets für beide Routenoptionen identisch. FLÜGEL ET AL. (2019) unterscheiden in der Befragung Automatisierungsstufen, ohne diese explizit zu nennen. Stattdessen werden den Befragten Aktivitäten genannt, die sie während der Fahrt durchführen können: hören, lesen, etwas anschauen und schlafen. Im ersten Fall handelt es sich um ein CV, in Letzterem um ein vollautomatisiertes Fahrzeug. FLÜGEL ET AL. (2019) ermitteln einen um durchschnittlich 21 % reduzierten Zeitwert für AV, für vollautomatisierte Fahrzeuge beträgt die Verringerung 30 %.

WADUD UND HUDA (2019) führen eine Befragung durch, die auf die potenziellen Nutzungsmöglichkeiten der Fahrtzeit in vollautomatisierten Fahrzeugen abzielt. Sie ergänzen ihre Umfrage durch die Befragung von Personen, die einen angestellten Chauffeur haben, da diese Situation Ähnlichkeiten zur Nutzung von AV aufweist. WADUD UND HUDA (2019) können deren angegebene Aktivitäten mit den Präferenzen der anderen Befragungsteilnehmer abgleichen und in gewisser Weise validieren, was Personen, die in einem AV chauffiert werden, tatsächlich ausüben würden. Es zeigt sich, dass es große Ähnlichkeiten zwischen den angegebenen Präferenzen und den ausgeübten Aktivitäten der chauffierten Personen gibt. Der einzige relevante Unterschied ist die Angabe, die die Umfrageteilnehmenden am häufigsten und die chauffierten Personen gar nicht angegeben haben, die Straße weiter zu beobachten.

Die Ergebnisse der Befragung zeigen, dass nicht nur Arbeiten oder Lernen als lohnenswerter Zeitvertreib angesehen wird, sondern auch nichtproduktive Aktivitäten. Welchen Tätigkeiten sich AV-Nutzer zuwenden würden, hängt neben dem Fahrtzweck auch von der Fahrtrichtung ab. Vor allem bei der Heimkehr von Dienstreisen oder Arbeitsstelle werden entspannte Aktivitäten bevorzugt, die keine intensive Aufmerksamkeit erfordern. WADUD UND HUDA (2019) finden außerdem heraus, dass die Zeit in einem AV als wertvoller empfunden wird als mit den heute zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln. Diese Wahrnehmung ist für Pkw-Fahrer und Radfahrer stärker ausgeprägt als für

Fußgänger und vor allem ÖV-Nutzer, da diese auch heute schon die Zeit relativ sinnvoll nutzen können, da sie nicht mit einer Fahraufgabe beschäftigt sind.

Als einzige Studie fragen WADUD UND HUDA (2019) ab, ob die Personen an Reisekrankheit leiden. Obgleich keine statistisch signifikanten Zusammenhänge aus der Angabe für die Zeitwahrnehmung in AV abgeleitet werden können, weisen sie trotzdem darauf hin, dass die Reisekrankheit den Nutzen der Zeit in AV schmälern könnte. Dies gilt insbesondere für Personen, die beim Lesen eines Buches oder dem ständigen Betrachten eines Bildschirms anfällig dafür sind.

KOLAROVA UND STECK (2020) führen eine Revealed- und Stated-Preference-Befragung mit über 400 Teilnehmenden aus Deutschland durch, in der sie sich auf Fernreisen konzentrieren. Ihnen zufolge gibt es relevante Unterschiede in der Moduswahl für den Fernverkehr im Vergleich zum Alltagsverkehr. Zusätzlich findet dieses Themengebiet bisher in der Literatur nicht sonderlich viel Beachtung (KOLAROVA UND STECK (2020)). Sie ermitteln für AV-Nutzer einen um 22 % niedrigeren Zeitwert als für Personen, die selbst fahren.

Abgesehen von der fahrfremden Aktivität und des Fahrtzwecks kann die Wahrnehmung der im AV verbrachten Zeit auch für verschiedene Nutzergruppen variieren (STECK ET AL. (2018), KOLAROVA ET AL. (2019a)). Darauf weisen auch bereits die Erkenntnisse aus Kapitel 3.2 zur Akzeptanz und Zahlungsbereitschaft hin, da die dort erwähnten Studien häufig Zusammenhänge zu soziodemografischen Faktoren herstellen können.

Der Fokus und zugehörige Annahmen der Befragungen variieren teilweise hinsichtlich der Automatisierungsstufe, der Unterscheidung nach Fahrtzweck, der Eingrenzung des Fahrtzwecks oder der betrachteten Fahrtumstände (Alltagsverkehr oder Fernverkehr). Dennoch stimmen die Tendenzen der Ergebnisse für die meisten vorgestellten Studien überein und deuten darauf hin, dass Menschen die Reisezeit bei Fahrten mit AV anders – und zwar positiver – wahrnehmen als mit CV. Da sich die Zeitwahrnehmung auf Ziel-, Modus- und Routenwahl auswirkt, müssen Verkehrsnachfragemodelle in der Lage sein, dies zu berücksichtigen.

3.3.4 Angebotsqualität und Erreichbarkeit

Die Verkehrsangebotsqualität kann mithilfe verschiedener Kriterien und Kenngrößen (Beispiel jeweils in Klammern) nach FRIEDRICH (2020) bewertet werden:

- Zeitaufwand (Reisezeit),
- Zuverlässigkeit (Abweichung von Soll-Reisezeit),
- Sicherheit (Fahrtweitenanteil auf sicheren oder geeigneten Strecken),
- Komfort (Fahrzeugausstattung),
- Zeitliche Verfügbarkeit (Betriebszeit),
- Direktheit (Umwegfaktor).

Die Erreichbarkeit umfasst, mit welchen Aufwänden Reisende welche Anzahl an Zielen erreichen können. Eine Verbesserung der Erreichbarkeit bedeutet beispielsweise, dass ein Ziel mit geringerem Aufwand erreicht werden kann oder mit demselben Aufwand mehr Ziele erreicht werden können.

Als Folge der potenziellen Wirkungen der drei vorangegangenen Kapitel ergeben sich Änderungen in der Angebotsqualität und Erreichbarkeit. Hinzu kommen mögliche Änderungen, die die Themen Parken und Verkehrsmittelverfügbarkeit betreffen. Die Zusammenhänge werden im Folgenden kurz umrissen. Dabei wird in jedem Bereich von der laut dem Großteil der vorgestellten Studien (sofern vorhanden) wahrscheinlichsten Wirkungstendenz von AV ausgegangen.

Durch die in Kapitel 3.3.1 beschriebenen möglichen Kapazitätsgewinne für verschiedene Straßenanlagen aufgrund kürzerer Fahrzeugfolgeabstände von AV können sich kürzere Fahrt- und damit Reisezeiten für den MIV ergeben. Die positive Wirkung höherer Kapazitäten auf Fahrtzeiten steigt mit der auftretenden Verkehrsstärke. Durch höhere Kapazitäten und eine gleichmäßigere Fahrweise von AV können sich Anzahl und Ausmaß von Verkehrsstaus verringern.

Wie aus Abschnitt 3.3.2 hervorgeht, können AV die Verkehrssicherheit erhöhen. Dadurch kommt es zu weniger Unfällen (FAGNANT UND KOCKELMAN (2015)), was wiederum weniger Staus zur Folge hat. In einer Literaturrecherche von RÖSENER ET AL. (2019) konnte kein exakter Wert für den Anteil von Unfällen als Stauursache ermittelt werden, da die Anteile aufgrund unterschiedlicher Datengrundlagen und Indikatoren variieren. Ihre Analyse des Potenzials der Stauvermeidung durch eine Verringerung der Unfälle zeigt, dass wenn 20 % aller Staus durch Unfälle verursacht werden, 1 % bis 11 % aller Staus auf deutschen Autobahnen vermieden werden könnten. Die Wirksamkeit automatisierter Fahrzeuge zur Unfallvermeidung hängt von ihrer Marktdurchdringung ab und beträgt 4 % bis 53 % (RÖSENER ET AL. (2019)).

Aus den beiden vorigen Absätzen folgt, dass durch Einführung von AV Reisezeiten sinken und die Reisezeitzuverlässigkeit steigen kann. Eine höhere Reisezeitzuverlässigkeit kann als eine höhere Wahrscheinlichkeit einer pünktlichen Ankunft oder als eine geringere Variabilität der Reisezeit aufgrund unvorhergesehener Ursachen wie Nachfrageschwankungen oder Zwischenfällen interpretiert werden (TRB (2010)).

Durch das Abgeben der Fahraufgabe können Personen die Fahrtzeit anderweitig nutzen und nehmen folglich diese anders wahr. Wie in Kapitel 3.3.3 diskutiert, empfinden Reisende die Fahrtzeit in AV dann als kürzer oder weniger negativ. Ein geringerer Zeitwert für Fahrten mit AV bedeutet, dass die empfundene Reisezeit im Vergleich zu Fahrten mit CV sinkt.

Automatisierte Fahrfunktionen können den Komfort für den Reisenden auch erhöhen, indem sie den Anwendungsfall des Parkens abdecken. Dies kann zum einen den Parkvorgang an sich betreffen, der vom Fahrzeug selbstständig durchgeführt wird. Zum anderen könnte sich durch Vernetzung mit der Infrastruktur oder auch anderen Fahrzeugen die Parksuchzeit reduzieren lassen, weil bereits bekannt ist, an welchen Orten

Parkplätze verfügbar sind. Es ist auch vorstellbar, dass das AV den Passagier am Zielort aussteigen lässt, um danach eigenständig einen Parkplatz zu suchen. Das setzt voraus, dass das Fahrzeug in dem Umfeld und den vorherrschenden Bedingungen automatisiert und ohne Rückfallebene fahren kann und darf. Auch könnten so Parkkosten teilweise oder ganz vermieden werden. (FAGNANT UND KOCKELMAN (2015))

Vollautomatisierte Fahrzeuge stellen für Menschen, die bisher keinen Zugang zum MIV hatten, weil diese keine Fahrerlaubnis oder Fahrtüchtigkeit besitzen, eine zusätzliche Mobilitätsoption dar. Sobald diese AV verfügbar sind, kommt es durch den neuen Verkehrsmodus zu einer Verbesserung der Angebotsqualität und Erreichbarkeit für die bisher vom MIV ausgeschlossenen Nutzergruppen.

Gemäß der Annahme, AV können reale Fahrtzeitgewinne durch effizienteres und sichereres Fahren oder empfundene Fahrtzeitgewinne durch neue Möglichkeiten der Zeitnutzung und damit einer anderen Zeitwahrnehmung ermöglichen, wird die Angebotsqualität damit grundsätzlich gesteigert. In der Konsequenz verbessert sich die Erreichbarkeit, weil in der gleichen (empfundenen) Reisezeit mehr Ziele erreicht werden können.

3.3.5 Mobilitätsverhalten und Nachfrage

Die im vorigen Kapitel beschriebenen Änderungen in der Angebotsqualität und Erreichbarkeit können die Entscheidungen von Personen in verschiedenen Bereichen beeinflussen. Zum einen könnte es Auswirkungen auf die Wahl des Wohnorts oder Arbeitsplatzes geben, zum anderen werden Menschen ihr Mobilitätsverhalten anpassen. Das Mobilitätsverhalten umfasst die Anzahl der Wege bzw. Aktivitäten, die Reihenfolge der Aktivitäten, die Wahl des Verkehrsmittels und welcher Aufwand in Form von Entfernung und Dauer für Ortsveränderungen in Kauf genommen wird. Die individuellen Entscheidungen aller Verkehrsteilnehmenden bilden in Summe die Verkehrsnachfrage samt zugehöriger Größen Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistung und Verkehrszeitaufwand.

Die FGSV (2020b) beschreibt qualitative Wirkungen auf Mobilitätsverhalten und Nachfrage durch AV und nennt beispielsweise, dass Fahrtweiten aufgrund einer anderen Zeitnutzung ansteigen und Effizienzgewinne im Verkehrsablauf möglicherweise durch mehr und längere Fahrten ausgeglichen werden. Eine Zukunft mit AV, die automatisierte Fahrten von Tür-zu-Tür beherrschen, führt aufgrund der erhöhten Bequemlichkeit zu induziertem Verkehr in Form von modalen Verlagerungen (FGSV (2020b)) und Neuverkehr durch Personen ohne Fahrerlaubnis (FAGNANT UND KOCKELMAN (2015)). Zusätzlich können Leerfahrten für Parkplatzsuchverkehr oder Heimkehr von AV das Verkehrsaufkommen insgesamt erhöhen (KLEIN UND ALTENBURG (2019)).

Um durch AV ausgelöste Veränderungen der Nachfrage auch quantitativ bestimmen zu können, können Verkehrsnachfragemodelle eingesetzt werden. Diese Modelle bilden, wie im Abschnitt 2.3 erläutert, die verkehrsbezogenen Entscheidungen von Personen

oder -gruppen nach. Ändert sich das Mobilitätsverhalten, muss dies im Verkehrsnachfragemodell berücksichtigt werden.

Im Folgenden wird eine Auswahl von Studien vorgestellt, die mithilfe von Verkehrsnachfragemodellen die Auswirkungen von AV auf das Mobilitätsverhalten der Menschen und die Verkehrsnachfrage bestimmen. Die erläuterten Ergebnisse der Arbeiten beziehen sich dabei auf AV, die ausschließlich im Privatbesitz vorkommen.

GUCWA (2014) untersucht die Auswirkungen von AV auf den Stadtverkehr mit einem aktivitätsbasierten Modellansatz für die San Francisco Bay Area. Die Studie nimmt an, dass AV immer noch die Anwesenheit einer Person mit Fahrerlaubnis erfordern. Die Straßenkapazität (+10 %, +100 %) und der Zeitwert („high quality rail“, -50 %, -100 %) werden in verschiedenen Szenarien variiert. Wenn man die extreme Annahme, dass die Fahrzeit in AV vernachlässigt wird, ausschließt, zeigen die Ergebnisse einen Anstieg der zurückgelegten Fahrzeugkilometer (FzgKm) von 4-8 % im Vergleich zum Fall ohne AV.

LEVIN UND BOYLES (2015) integrieren AV in ein Vier-Stufen-Modell, das das innerstädtische Netz von Austin umfasst. Sie leiten die Kapazitätsänderung basierend auf der Geschwindigkeits-Dichte-Beziehung von GREENSHIELDS ET AL. (1935) und einem reduzierten Folgeabstand auf Autobahnen bei Staudichte für AV ab. Mit der Annahme der Verfügbarkeit vollautomatisierter Fahrzeuge sind Leer(rund)fahrten zur Einsparung von Parkkosten möglich, wobei sich dadurch ergebende höhere Kraftstoffkosten auch berücksichtigt werden. Für die Durchdringung der privaten Fahrzeugflotte mit AV teilen LEVIN UND BOYLES (2015) Haushalte in Einkommensklassen ein und gehen davon aus, dass AV zuerst für die einkommensstärksten Haushalte und dann schrittweise für immer mehr Klassen verfügbar sind. Bei einem AV-Anteil von 100 % sinkt die ÖV-Fahrtenanzahl um ca. 61 %, während sich die Anzahl der Personenfahrten im MIV in etwa verdoppelt und die Anzahl der gesamten Fahrzeugfahrten durch einen hohen Anteil an Leerfahrten um 271 % steigt. Die Kapazitätsgewinne können das zusätzliche Verkehrsaufkommen jedoch teilweise kompensieren, sodass die durchschnittliche, längengewichtete Streckengeschwindigkeit um 9 % sinkt.

CHILDRESS ET AL. (2015) untersuchen mögliche Auswirkungen von AV mit einem aktivitätsplanbasierten Modell für die Seattle Region. Sie setzen keine expliziten AV-Anteile, sondern bilden Szenarien, in denen die Annahmen nach und nach die Eigenschaften von AV repräsentieren sollen. Zunächst wird die Kapazität für Autobahnen und Hauptverkehrsstraßen um 30 % erhöht. In der nächsten Stufe erfahren Pkw-Nutzer mit einem hohen Zeitwert einen empfundenen Zeitvorteil von 35 %. Diese Zeitwertreduktion wird auch noch auf alle Pkw-Nutzer ausgeweitet und durch um 50 % reduzierte Parkkosten ergänzt. Über alle Szenarien ermitteln sie einen Anstieg der FzgKm zwischen 4 % und 20 %. Der Grund liegt in der Zunahme der Fahrzeugfahrten und der Fahrdauer. Für einen empfundenen Zeitvorteil aller Pkw-Nutzer und reduzierten Parkkosten steigen die zurückgelegten Fahrzeugstunden (FzgStd) um 17 %, in den anderen Fällen sinken sie geringfügig.

KIM ET AL. (2015) verwenden ebenfalls ein aktivitätenplanbasiertes Modell, um die Auswirkungen von AV für Atlanta im Jahr 2040 zu ermitteln. Für den Fall einer vollständig automatisierten Fahrzeugflotte entwickeln sie Szenarien, in die schrittweise folgende Annahmen einfließen: Kapazitätsgewinne um 50 % aufgrund der Verfügbarkeit von CACC, Reduzierung des Zeitwerts um 50 % durch Produktivitätssteigerungen, Reduzierung der Betriebskosten um 70 % und Wegfall der Parkkosten durch Leerfahrten von AV. Über alle Szenarien steigt die Anzahl der Pkw-Fahrten um 1-3 %, während die durchschnittliche Fahrtdauer um etwa 20 % und die FzgKm um 4-24 % zunehmen. Kapazitätseffekte als alleinige Änderung führen zu einem Rückgang der FzgStd um 9 %. Zusammen mit der Reduktion des Zeitwerts bleiben die FzgStd auf dem Niveau des Basisfalls ohne AV, mit Reduktion der Betriebskosten und Parkkosten steigen die FzgStd um 12 %.

LAMONDIA ET AL. (2016) analysieren Verkehrsumfragen zum Mobilitätsverhalten im Fernverkehr und entwickeln damit ein Fernverkehrsmodell mit Komponenten zur Verkehrserzeugung und Moduswahl. Sie beziehen AV als neuen Modus und Konkurrent für CV und das Flugzeug im Modell ein. AV unterscheiden sich dabei von CV durch eine geringere empfundene Reisezeit (-25 %) und höhere Reisekosten (+100 %). Im Fall ohne AV weisen CV bis Entfernungen von 200 Meilen den höheren Modusanteil auf, darüber verhält es sich umgekehrt. Sofern AV verfügbar sind, gewinnen diese für Ortsveränderungen bis 500 Meilen Entfernung Anteile von CV und Flugzeug gleichermaßen. Für größere Entfernungen verliert das Flugzeug in geringerem Ausmaß Anteile und ist unverändert für Wege über 200 Meilen das Hauptverkehrsmittel. Der Anteil der mit AV zurückgelegten Wege ist im Modell für alle Entfernungsklassen marginal im Vergleich zu dem Anteil von CV.

AULD ET AL. (2017) nutzen ein aktivitätenplanbasiertes Modell des Großraums Chicago, um die Auswirkungen von AV, die mit CACC ausgestattet sind, zu untersuchen. Ihre Annahmen betreffen hauptsächlich den AV-Anteil, Erhöhungen der Straßenkapazität von bis zu 77 % und eine Bandbreite von Zeitwertreduktionen von 0 % bis 75 %. Änderungen in der Moduswahl werden nicht berücksichtigt. Wirken ausschließlich Kapazitätsgewinne, ergibt sich im Modell ein Anstieg der FzgKm um 4 %. Eine Reduktion des Zeitwerts um 25 % bei unveränderter Kapazität führt bei einem AV-Anteil von 75 % zu zusätzlichen 12 % FzgKm. Im Szenario mit maximalen Kapazitätsgewinnen, einem um 25 % reduzierten Zeitwert und 100 % AV steigen die FzgKm um 21 % und die FzgStd sowie die durchschnittlichen Reisezeiten um jeweils 14 %.

ZHANG ET AL. (2018) nutzen Daten aus einem aktivitätenplanbasierten Modell und einer Umfrage zum Mobilitätsverhalten in der Metropolregion Atlanta, um Wegeprofile privater Pkw zu synthetisieren. Für die so ermittelte Nachfrage untersuchen sie, ob Haushalte bei der gemeinsamen Nutzung vollautomatisierter Fahrzeuge unter Annahme zeitgenau und räumlich identischer Wege aller Haushaltsmitglieder Fahrzeuge einsparen könnten. Demnach ergeben sich Änderungen bezüglich der FzgKm nur durch Leerfahrten zwischen Ankunft und Abfahrt unterschiedlicher Haushaltsmitglieder an verschiedenen Orten. Besteht die Fahrzeugflotte vollständig aus AV, können 18 % der Haushalte Fahrzeuge einsparen. Dies entspricht einer Reduktion von 10 % aller Fahrzeuge bei

gleichzeitigem Anstieg der gesamten FzgKm um 13 %. Wenn die Aktivitätenpläne der Haushaltsmitglieder geringfügig angepasst werden könnten, indem um bis zu 15 min spätere Ankunftszeiten toleriert würden, können 24 % der Haushalte Fahrzeuge einsparen. Eine um 12 % kleinere Fahrzeugflotte würde dann 17 % zusätzliche FzgKm durch Leerfahrten verursachen. Obwohl ZHANG ET AL. (2018) annehmen, dass das Mobilitätsverhalten der Personen unverändert bleibt, zeigt die Studie, wie sich vollautomatisierte Fahrzeuge auf Fahrzeugbesitz und Verkehrsleistung auswirken können.

HÖRL ET AL. (2019) führen Simulationen mit einem aktivitätenplanbasierten Modell durch, das auf den Ergebnissen einer Kostenstrukturanalyse konventioneller und automatisierter Verkehrsmittel und einer großen Mobilitätsbefragung aufbaut. Im Szenario mit vollautomatisierten Fahrzeugen in Privatbesitz in Zürich und einer angenommenen Kapazitätssteigerung von 80 %, ermitteln sie einen Anstieg der FzgKm in der Stadt um 40 %. Annahmen über eine Zeitwertreduktion werden nicht explizit genannt, sind aber wohl über die Berücksichtigung der Umfrageergebnisse indirekt eingebunden. Die Auswirkung auf die FzgKm kommt größtenteils durch Änderungen in der Moduswahl und nur zu einem geringen Teil (0,5 %) durch Neuverkehr zustande.

KRÖGER ET AL. (2019) kombinieren das bereits in Kapitel 3.2 im Abschnitt Marktdurchdringung erwähnte Fahrzeugtechnologie-Diffusionsmodell mit einem räumlich nicht aufgelösten Verkehrsnachfragemodell, um mögliche Auswirkungen von vollautomatisierten Fahrzeugen für Deutschland und die USA zu untersuchen. Das Modell kombiniert mikroskopische (Erzeugung der Population und der Wegezählung) und makroskopische (kombinierte Modus- und Entfernungswahl) Elemente. KRÖGER ET AL. (2019) gehen von einer Reduktion des Zeitwerts für AV um 25 % ab der elften Fahrtminute und keinen Veränderungen der Straßenkapazität, aber geringen Zeiteinsparungen bei den Zu- und Abfahrtszeiten aus. Leerfahrten werden nicht berücksichtigt, aber neue Personengruppen wie Mobilitätseingeschränkte und Kinder haben nun Zugriff auf AV.

Die Modellergebnisse beinhalten je nach Szenario und Land unterschiedliche Anstiege des Wegeanteils für Pkw und der FzgKm. Tendenziell ist der AV-Anteil in Deutschland höher, trotzdem sind die FzgKm ungefähr gleich oder gar geringer als für die USA, weil dort die Kraftstoffkosten niedriger sind. Die durchschnittliche Fahrtweite steigt wegen des niedrigeren Zeitwerts und den Zeitersparnissen für Zu- und Abgangswege. Im Trend-Szenario mit AV-Anteilen von 8-10 % ergeben sich zusätzliche FzgKm von 2,4-3,4 %. Für das Extrem-Szenario ermitteln KRÖGER ET AL. (2019) Zuwächse der FzgKm von knapp 9 % bei AV- Anteilen von 29-38 %.

DIAS ET AL. (2020) integrieren vollautomatisierte Fahrzeuge in ein Vier-Stufen-Modell der Metropolregion Dallas-Fort-Worth. Für alle untersuchten Szenarien wird ein AV-Anteil von 40 % vorgegeben, die Durchdringung der Fahrzeugflotte orientiert sich dabei an den Haushaltseinkommen. Weitere Annahmen betreffen Verkehrserzeugungsraten für AV-Haushalte (+5 % oder +10 %), die Reduktion des Zeitwerts (-0 % oder -25 %) für Fahrten mit AV und Kapazitätseffekte. Letztere werden durch eine Anpassung der Pkw-Einheiten für AV berücksichtigt, statt pauschale Kapazitätserhöhungen zu setzen. Die Berechnung der PE-Faktoren basiert auf dem Folgeabstand ohne Kommunikation nach

TIENTRAKOOL ET AL. (2011) und wird auf 0,7 gesetzt. In den Szenarien mit leistungsfähigeren AV ermitteln DIAS ET AL. (2020) Anstiege der Kenngrößen Pkw-Wege (+2-3 %), FzgKm (+5-7 %), FzgStd (+0-3 %) und durchschnittliche Fahrtweite (+3-5 %). Für das Szenario, in dem AV ein PE-Faktor von 1,1 zugewiesen und der Zeitwert um 25 % reduziert wird, unterscheiden sich die Modellergebnisse davon teilweise. Die schlechtere Leistungsfähigkeit der AV beeinflusst die Wege mit Pkw (+2 %) nicht relevant, FzgKm (+3 %) und Fahrtweite (+1 %) nur geringfügig und FzgStd (+10 %) deutlich. Zusätzliche Pkw-Wege und etwas längere Fahrtweiten werden im Verkehrsablauf nicht mehr durch die erhöhte Leistungsfähigkeit der AV kompensiert und führen daher zu diesem Anstieg der FzgStd im Netz.

Die Ergebnisse des Großteils der vorgestellten Modellierungsstudien, die die Wirkungen von AV auf die Nachfrage untersuchen, zeigen, dass das Verkehrsaufkommen steigen wird. Gemeinsam mit zunehmenden Fahrtweiten ergibt das ein Zuwachs der Verkehrsleistung. Der Verkehrszeitaufwand ändert sich eher in kleinerem Ausmaß und nimmt teilweise zu, teilweise ab, da die Kapazitätsgewinne nicht immer die erhöhte Verkehrsleistung kompensieren können.

3.3.6 Energieverbrauch und Emissionen

Mit einem effizienteren Verkehrsablauf (FGSV (2020b)) bzw. der Verstetigung und Harmonisierung des Verkehrsflusses (FAGNANT UND KOCKELMAN (2015)) wird erwartet, dass es zu Einsparungen beim Energieverbrauch durch die Einführung von AV kommt. Steigende Fahrleistungen und die Kommunikation und Vernetzung der Fahrzeugflotte und ggfs. der Infrastruktur wirken dem entgegen (FGSV (2020b)).

RÖSENER ET AL. (2019) ermitteln für 100 % AV auf Autobahnen ein Einsparpotenzial von 8 % für den Energieverbrauch durch eine gleichmäßigere Fahrweise der Fahrzeuge. KRAIL ET AL. (2019) identifizieren harmonisierte Geschwindigkeitsprofile, eine optimierte Motoransteuerung, reduzierten Luftwiderstand und Berücksichtigung der Topografie als primäre Effekte, die sich auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen auswirken. Höhere Fahrleistungen des MIV durch induzierten Verkehr stellen den sekundären Effekt dar. In ihrer Studie werden die Wirkungspotenziale für verschiedene Fahrzeugklassen ermittelt. In der Pkw-Mittelklasse ergeben sich aus primären Effekten mögliche Reduktionen von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen von ca. 10 % für AV der Stufe 3 bis 16 % für AV der Stufen 4 und 5 bei hohen Durchdringungsraten (67-100 %).

3.3.7 Straßenraum und Verkehrsflächen

Sollten Parkvorgänge vollständig automatisiert ablaufen, könnte die Auslastung von Parkhäusern erhöht werden, was wiederum andere benötigte Parkflächen reduziert (FGSV (2020b)). Ferner führt die FGSV (2020b) an, dass durch die präzise und effiziente

Fahrweise von AV Flächeneinsparungen aufgrund von schmalere oder einer geringeren Anzahl von Fahrstreifen denkbar sind. Allerdings wird auch erwähnt, dass besondere Fahrzeuge wie solche der Müllabfuhr oder der Feuerwehr auch weiterhin genügend Platz brauchen, was die mögliche Einsparung von Verkehrsflächen mindert.

Auf der Seite der negativen Auswirkungen von AV auf den Straßenraum nennt die FGSV (2020b) eine Zunahme der Fahrleistung insgesamt, was eher mehr Verkehrsflächen erforderlich machen würde. Außerdem könnte es notwendig sein, die Verkehrsflächen für den MIV und andere Modi zur Konflikt- und Unfallvermeidung baulich zu trennen. Schließlich wird noch erwähnt, dass die Barrierewirkung von Straßen zunimmt, wenn diese von automatisierten Fahrzeugpools mit geringeren Abständen genutzt würden. (FGSV (2020b))

3.3.8 Siedlungsentwicklung

Um unter anderem die Wirkungen von AV auf die Siedlungsentwicklung zu untersuchen, entwickeln LEGÈNE ET AL. (2020) ein räumlich disaggregiertes Systemdynamikmodell der Region Kopenhagen, das die fünf Submodelle Bevölkerung, Entwicklung von Flächennutzung, Verkehr (ohne explizites Verkehrsnetz), Parken und Modal-Split enthält. Mit Hilfe dieses Modells vergleichen sie Siedlungsverteilung und Straßenflächenanteil des Jahres 2015 mit Zukunftsszenarien in 2070. Im Szenario mit privaten AV, für die eine Reduktion des Zeitwerts angenommen wird, ergeben sich laut Modell mehr Pkw, durchschnittlich längere Wege, mehr Pkw-Fahrten und Straßen und daher auch Flächenknappheiten.

Die Ergebnisse mancher in Kapitel 3.3.5 vorgestellten Modellierungsstudien zeigen ebenfalls, dass Menschen, die AV nutzen, die ihnen die Fahraufgabe ganz oder teilweise abnehmen können, oft längere Wege zurücklegen. Dieser Umstand – unter Berücksichtigung der jeweiligen zugrundeliegenden Annahmen – kann so interpretiert werden, dass bessere Erreichbarkeiten von Verkehrsteilnehmenden ausgenutzt werden. Zu diesem Schluss kommen auch MILAKIS ET AL. (2017). Ihnen zufolge kann eine verbesserte regionale Erreichbarkeit es den Menschen ermöglichen, kürzere Reisezeiten durch Wohnen, Arbeiten, Einkaufen oder Erholen in größerer Entfernung zu kompensieren. Als Konsequenz wäre eine Abwanderungswelle ehemaliger Innenstadt- und Vorstadtbewohner in ländliche Gebiete vorstellbar (MILAKIS ET AL. (2017)). Dies kann langfristig die Zersiedelung der Landschaft und dispersere Siedlungsstrukturen begünstigen (FGSV (2020b)). KLEIN UND ALTENBURG (2019) sprechen von einer Suburbanisierungswelle in der Siedlungsentwicklung der Zukunft mit AV.

3.4 Zwischenfazit

In den letzten Jahren hat das automatisierte Fahren in Forschung und Literatur zunehmend Beachtung gefunden und an Bedeutung gewonnen. Viele Projekte, Initiativen und Testfelder beschäftigen sich auf nationaler und internationaler Ebene mit Themen rund um automatisierte Fahrzeuge.

Um unterschiedlichen Funktionalitäten von AV Rechnung zu tragen, werden Automatisierungsstufen definiert (J3016:2021). Diese beschreiben die Zuständigkeiten für fahrende Person und automatisiertes Fahrsystem bezüglich Fahrzeugsteuerung, Objekterkennung und Rückfallebene und geben an, ob es Beschränkungen für die abgedeckten Betriebsbedingungen gibt.

Es gibt eine große Bandbreite an Prognosen zur Verfügbarkeit und Marktdurchdringung von Fahrzeugen bestimmter Automatisierungsstufen, die teilweise schon veraltet bzw. nicht mehr einzuhalten sind. Vorhersagen zur Verbreitung automatisierter Fahrzeuge sind grundsätzlich mit großer Unsicherheit behaftet. Wie sich AV, nachdem sie verfügbar sind, verbreiten, hängt maßgeblich von der Akzeptanz und Zahlungsbereitschaft der Menschen ab. Ergebnisse von Diffusionsmodellen und Schätzungen zeigen, dass es mehrere Jahrzehnte dauern könnte, bis AV große Anteile an der Fahrzeugflotte einnehmen.

Die Analyse vieler Veröffentlichungen gibt Aufschluss über potenzielle, verkehrsbezogene Wirkungen von AV. Durch geringere Fahrzeugfolgeabstände, eine gleichmäßigere Fahrweise und kürzere Reaktionszeiten wird der Verkehrsfluss effizienter. Sind AV in der Lage zu kommunizieren bzw. zu kooperieren, können diese Wirkungszusammenhänge als belastbarer angesehen werden. Durch die Automatisierung erhöht sich die Verkehrssicherheit und es wird weniger Unfälle geben. Als Folge sind weniger Verkehrsstaus zu erwarten. Parkvorgänge mit AV werden komfortabler und können ggfs. Kosten einsparen. Alle genannten Effekte führen zu reduzierten Reisezeiten und erhöhter Reisezeitzuverlässigkeit.

Für die Zeitwahrnehmung in AV gibt es viele Einflussfaktoren: Automatisierungsstufe, Fahrtzweck, durchgeführte Aktivität der gefahrenen Person oder Fahrtweite. Alles in allem ist aber mit einer Reduktion des Zeitwerts für Fahrten mit AV zu rechnen, was sich in empfundenen Reisezeitvorteilen für Personen niederschlägt. Gemeinsam mit den oben erläuterten Reisezeitvorteilen kommt es damit zu einer Steigerung der Angebotsqualität und Verbesserung der Erreichbarkeit. Dies wirkt sich auf das Mobilitätsverhalten von Verkehrsteilnehmenden aus und beeinflusst so die Verkehrsnachfrage.

Verkehrsnachfragemodelle können Planern und Entscheidungsträgern helfen, die potenziellen Auswirkungen von AV auf das Mobilitätsverhalten und die Verkehrsnachfrage zu bestimmen und besser zu verstehen. Die vorgestellten Modellierungsstudien nutzen dafür verschiedene Modellierungsansätze. Aktivitätenplanbasierte Wegekettenmodelle (GUCWA (2014), CHILDRESS ET AL. (2015), KIM ET AL. (2015), AULD ET AL. (2017), ZHANG ET AL. (2018), HÖRL ET AL. (2019)) dominieren hierbei. Diese Modellklasse erweitert

Aktivitätenkettenmodelle um Entscheidungen zu Dauer und Reihenfolge der Aktivitäten (FRIEDRICH ET AL. (2019a)). LEVIN UND BOYLES (2015) sowie DIAS ET AL. (2020) verwenden aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle wie das Vier-Stufen-Modell, das im Kapitel 2.3.2 vorgestellt wird. LAMONDIA ET AL. (2016) entwickeln ein Nachfragemodell für den Fernverkehr, welches jedoch nur Verkehrserzeugung und Moduswahl beinhaltet. KRÖGER ET AL. (2019) nutzen ein Verkehrsnachfragemodell, bei dem die Entfernungswahl die Zielwahl ersetzt. Da das Modell räumlich nicht aufgelöst ist, kann es keine Routenwahl abbilden.

Der Großteil der vorgestellten Studien nutzt verkehrsnachfragebasierte Fahrzeitermittlungsverfahren zur Bestimmung der Fahrzeiten. Die Fahrzeit ist Hauptbestandteil des Nutzens einer Alternative, der wiederum für die Ziel-, Modus- und Routenwahl von großer Relevanz ist. Änderungen der tatsächlichen oder empfundenen Fahrzeit wirken sich somit auf viele Bereiche der Verkehrsnachfrageberechnung aus.

Um die Auswirkungen von AV abzuschätzen, ist es notwendig, dass Annahmen getroffen werden. Unterschiede bestehen darin, ob AV überhaupt explizit in das Modell eingebaut werden, welche AV-Anteile untersucht werden und ob bzw. wie die Durchdringung der Fahrzeugflotte modelliert wird. Für Arbeiten, in denen Ersteres nicht der Fall ist, wird indirekt über Annahmen versucht, Wirkungen von AV über veränderte Eigenschaften von Pkw abzubilden (GUCWA (2014), CHILDRESS ET AL. (2015), KIM ET AL. (2015)). Wenn AV in den Modellen als separates Verkehrsmittel integriert sind, werden teilweise nur ein AV-Anteil (DIAS ET AL. (2020)), mehrere vorgegebene (AULD ET AL. (2017)) oder mit einer Mobilitätswerkzeugwahl ermittelte (HÖRL ET AL. (2019)) Anteile vorgegeben. Die Durchdringung der Fahrzeugflotte wird in einzelnen Arbeiten über ein Diffusionsmodell (KRÖGER ET AL. (2019)) oder über die haushaltseinkommensabhängige, stufenweise Verfügbarkeit (LEVIN UND BOYLES (2015)) abgebildet.

In sieben der zehn vorgestellten Arbeiten werden Effekte durch AV auf den Verkehrsfluss gesetzt oder hergeleitet. Dabei wird meist die Kapazität der Straßenanlagen direkt erhöht. Dies geschieht teilweise nur für einen bestimmten AV-Anteil oder unabhängig von variablen AV-Anteilen. Eine Ausnahme hiervon bilden DIAS ET AL. (2020), die den Einfluss von AV über die Leistungsfähigkeit der Fahrzeugflotte bei unveränderter Kapazität in Form veränderter PE-Faktoren berücksichtigen. Eine veränderte Zeitwahrnehmung wird ebenfalls in sieben Studien direkt über Reduktionen des Zeitwerts von AV-Fahrten in den Modellen inkludiert. Leerfahrten von AV werden wie auch das Thema Parken in jeweils drei Arbeiten betrachtet. Parkkosten können demnach mit AV reduziert werden oder entfallen sogar ganz. Falls Annahmen zu den erwähnten Bereichen wie z. B. Kapazität oder Zeitwahrnehmung fehlen, liegt das häufig daran, dass sie für den Zweck der Arbeit irrelevant sind.

Modellierungsansatz und Annahmen zu den Eigenschaften und Wirkungen von AV bestimmen gemeinsam den Rahmen und den Fokus einer Studie. Für eine kurze, qualitative Zusammenfassung der Ergebnisse werden nun die Studien herangezogen, die die Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage in Form von Verkehrsaufkommen, -leistung und -zeitaufwand untersucht haben. Deren Modellergebnisse stimmen in den

Tendenzen größtenteils überein. Zum einen wird das Verkehrsaufkommen mit der Verfügbarkeit von AV steigen, zum anderen führen längere Fahrtweiten und mehr Wege zu einer höheren Verkehrsleistung. Beides ist darauf zurückzuführen, dass Pkw-Fahrten mit AV komfortabler und attraktiver werden. Die Auswirkungen auf den Verkehrszeitaufwand fallen unterschiedlich aus. Die Studien weisen sowohl Reduktionen als auch Anstiege diesbezüglich aus. Teilweise können die zusätzlichen Verkehrsaufkommen durch Kapazitätsgewinne kompensiert werden, sodass die Änderungen des Verkehrszeitaufwands nicht mit denen der Verkehrsleistung korrelieren. Bis zu welchem Ausmaß diese Kompensation möglich ist, hängt von der Netzauslastung des Falls ohne AV und den Annahmen zu den Eigenschaften und Wirkungen von AV im Detail ab.

Der Energieverbrauch könnte durch die gleichmäßigere Fahrweise bzw. Verstetigung und Harmonisierung des Verkehrsflusses sinken. Eine erhöhte Verkehrsleistung wirkt dem allerdings entgegen. Durch bessere Erreichbarkeiten werden die Fahrtweiten wie bereits erwähnt länger, was langfristig die Zersiedelung der Landschaft und dispersere Siedlungsstrukturen begünstigen kann.

Die Forschung im Kontext der Modellierung von AV konzentriert sich bisher hauptsächlich entweder auf mikroskopische Verkehrsflussmodelle oder auf mikroskopische (agentenbasierte) Verkehrsnachfragemodelle. Letztere nutzen häufig einen aktivitätenplanbasierten Ansatz. Es gibt nur sehr wenige Arbeiten, die die makroskopische Verkehrsnachfragemodellierung in Form aktivitätenbasierter Einzelwegmodelle oder aktivitätenbasierter Wegekettenmodelle nutzen.

Die Verkehrsnachfragemodellierung ist, unabhängig von Modellierungsansätzen, ein wichtiges Werkzeug für Verkehrsplanung und -politik, um die Tendenz, aber auch das Ausmaß potenzieller Wirkungen von AV frühzeitig zu kennen und zu verstehen. Die Modellierung braucht dafür Methoden, die zum Forschungsziel gehörende Annahmen berücksichtigen und Wirkungen abbilden können. Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit Modellierungsmethoden für makroskopische Verkehrsnachfragemodelle, die die Eigenschaften automatisierter Fahrzeuge berücksichtigen können.

4 Modellierung automatisierter Fahrzeuge in makroskopischen Nachfragemodellen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Modellerweiterungen, die notwendig sind, um die Nachfragewirkungen automatisierter Fahrzeuge mit makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen untersuchen zu können. Methoden zur Einbindung automatisierter Mobilitätsdienstleistungen werden ergänzend erläutert, sind aber im Detail nicht Bestandteil dieser Arbeit. Für die Bereiche der Fahrzeitermittlung und Zeitwahrnehmung werden Methoden vorgestellt, die es dem Modellanwender ermöglichen, Eigenschaften und Wirkungen automatisierter Fahrzeuge abzubilden. Diese sind im Rahmen des EU-Forschungsprojekts CoEXist entwickelt und in der Modellierungssoftware VISUM umgesetzt worden. Die Vorstellung der Methoden erfolgt jedoch softwareunabhängig, sodass sie sich in anderen Programmen zur makroskopischen Verkehrsnachfragemodellierung in ähnlicher Weise umsetzen lassen.

4.1 Überblick und Abgrenzung

Verkehrsnachfragemodelle bilden die Entscheidungsprozesse nach, die zu Ortsveränderungen im Verkehrsnetz führen. Die Entscheidungen der Ziel-, Modus- und Routenwahl werden von der Angebotsqualität beeinflusst, die wiederum maßgeblich von den auslastungsabhängigen Fahrzeiten im Straßennetz abhängt. Deshalb ist eine Rückkopplung zwischen den Modellstufen üblich, die solange durchgeführt wird, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage einstellt.

Für die Integration automatisierter Fahrzeuge in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle ist entscheidend, ob AV für den Privatbesitz verfügbar sind oder als Teil einer Mobilitätsdienstleistung in Modelle integriert werden sollen. Die beiden folgenden Unterkapitel geben zunächst allgemeine Hinweise zur Modellierung automatisierter Fahrzeuge für beide Varianten.

4.1.1 Automatisierte Fahrzeuge im Privatbesitz

Die dem Autor bekannten makroskopischen Verkehrsnachfragemodelle sind, zusammen mit der Software, in der sie betrieben werden, zum Zeitpunkt der Bearbeitung des Forschungsprojektes CoEXist nicht in der Lage, als Werkzeug zur Untersuchung der Nachfragewirkungen automatisierter Fahrzeuge im Privatbesitz zu dienen. Um diese Wirkungen von AV in Verkehrsnachfragemodellen abbilden zu können, sind also Erweiterungen erforderlich. Abbildung 12 zeigt vereinfacht den schematischen Ablauf des Vier-Stufen-Modells mit Rückkopplung und die Komponenten, die erweitert werden müssen.

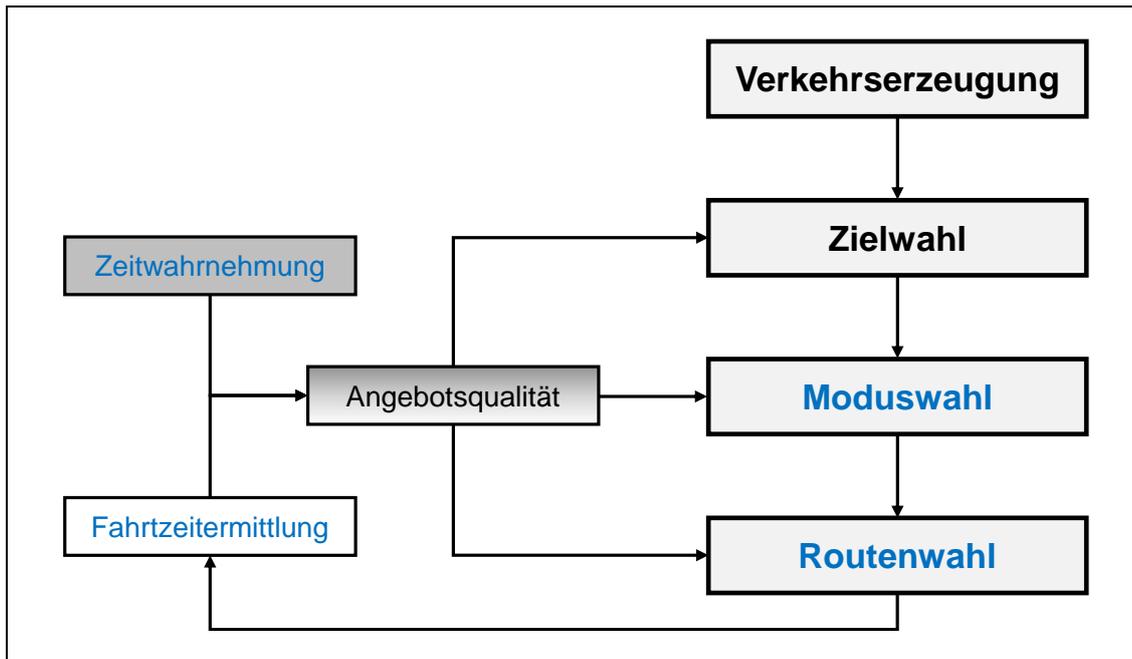


Abbildung 12: Modellstufen und Komponenten in Verkehrsnachfragemodellen, die teilweise für AV angepasst werden müssen (blau).

Fahrzeitermittlung

Für die Ermittlung der Fahrzeit in makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen werden innerhalb der verkehrsnachfragebasierten Fahrzeitermittlungsmodelle die auslastungsabhängigen Modelle eingesetzt. Sie ermitteln die Fahrzeit, die bei einer gegebenen Nachfrage für eine Verkehrsanlage zu erwarten ist. Die Anwendung erfolgt vielfach während der Umlegung, bis diese konvergiert und das Ergebnis in Form der Routenwahl feststeht. Die Fahrzeiten, die sich dann aus der Routenwahl ergeben, gehen in die Angebotsqualität ein.

Automatisierte Fahrzeuge werden die Kapazität im Verkehrsnetz hauptsächlich durch ein anderes Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselverhalten verändern oder die Kapazität auf andere Art nutzen. Die Veränderungen werden von den Eigenschaften der automatisierten Fahrzeuge und vom Anteil dieser Fahrzeuge in der Fahrzeugflotte abhängen. Diese Einflussgrößen müssen auf geeignete Weise in vorhandene Fahrzeitermittlungsmodelle integriert werden.

Zeitwahrnehmung

Welchen Wert Personen der Zeit zuschreiben, hängt insbesondere von der Zeitwahrnehmung ab. Mit der Verrechnung von Fahrzeit und Zeitwert ergibt sich die bewertete Fahrzeit, welche die bewertete Angebotsqualität bildet. Diese beeinflusst in Form von Nutzen- bzw. Widerstandswerten von Zielen, Modi oder Routen die Wahl von Alternativen.

Es ist wahrscheinlich, dass sich die Zeitwahrnehmung mit der Nutzung von AV ändert, weil die fahrenden Personen sich anderen Tätigkeiten als der Fahraufgabe zuwenden können. Aus diesem Grund muss die Berechnung der empfundenen Fahrzeit in einem AV angepasst werden.

Moduswahl

Erforderliche Anpassungen in der Moduswahl sind davon abhängig, ob für die Nutzung von AV eine Fahrerlaubnis benötigt wird oder nicht. Das ist voraussichtlich dann nicht der Fall, wenn das Fahrzeug entweder vollautomatisiert ist, oder die ODD für hochautomatisierte Fahrzeuge den fahrerlosen Betrieb unter allen Bedingungen im Modellraum einschließt. Es könnte rein geographische oder funktionelle, örtlich abhängige Limitationen in der ODD geben: Beispielsweise könnte ein hochautomatisiertes Fahrzeug nur Rechtsverkehr beherrschen und kann daher in Deutschland unter allen Umständen automatisiert fahren und von Personen ohne Fahrerlaubnis genutzt werden, jedoch nicht in Großbritannien. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird nachfolgend ausschließlich die Unterscheidung, ob AV vollautomatisiert sind oder nicht, genutzt.

Mit der Verfügbarkeit vollautomatisierter Fahrzeuge für den Privatbesitz sollte das Modell um einen neuen Modus ergänzt werden, den Personen ohne Fahrerlaubnis, aber mit verfügbarem automatisiertem Fahrzeug, nutzen können. Das erfordert aber auch die separate Berücksichtigung der Eigenschaften Fahrerlaubnis und Fahrzeugverfügbarkeit in den Personengruppen.

Sollten AV nicht vollautomatisiert sein, jedoch im Modell berücksichtigt werden, kann der Modus für das Fahren eines privaten Pkw, nachfolgend Pkw-Fahrer, um AV ergänzt werden. Es gibt dann die zwei Verkehrssysteme CV und AV, die für den Modus Pkw-Fahrer in Frage kommen. Die konkrete Nutzung hängt davon ab, welche Art der beiden Verkehrsmittel eine Person besitzt. Die Attraktivität des Modus Pkw-Fahrer wird dann auch von den Eigenschaften von AV in Abhängigkeit des AV-Anteils an der Fahrzeugflotte beeinflusst.

Routenwahl

Wirkungen aus einer veränderten Leistungsfähigkeit von AV auf bestimmten Netzelementen werden über ein ertüchtigtes Fahrzeitermittlungsverfahren in der Umlegung und damit für die Routenwahl implizit berücksichtigt. Einflüsse der Angebotsqualität aufgrund von einer anderen Zeitwahrnehmung erfordern Anpassungen der Widerstandsfunktionen für das Verkehrssystem AV.

Andere Modellstufen

Insbesondere mit der Verfügbarkeit vollautomatisierter Fahrzeuge sind Änderungen des produzierten Verkehrs bzw. der Mobilitätsraten von Personengruppen denkbar. Als Quelle für Mobilitätsraten werden Haushaltsbefragungen verwendet. Da diese für einen Zustand mit AV aber noch nicht vorliegen, müssten Annahmen getroffen werden. Davon

sehen beinahe alle Modellierungsstudien, die die Nachfragewirkungen von AV im Privatbesitz untersuchen und dem Autor bekannt sind, ab. Änderungen der Modellstufe Verkehrserzeugung werden im weiteren Verlauf der Arbeit nicht betrachtet.

In der Zielwahl fließen Einflüsse von AV über die veränderten, aggregierten Aufwände, Ziele zu erreichen, ein. Es muss sichergestellt werden, dass durch ein neues Verkehrssystem AV des Modus Pkw-Fahrer veränderte Kenngrößen oder die einem neuen Modus AV zugehörigen Kenngrößen in den Aufwänden für die Zielwahl berücksichtigt werden.

4.1.2 Mobilitätsdienstleistungen mit vollautomatisierten Fahrzeugen

Vollautomatisierte Fahrzeuge können zukünftig auch im Rahmen neuer Mobilitätsdienstleistungen zum Einsatz kommen. Fahrerlose Fahrzeuge können dann von Personen ohne Fahrerlaubnis alleine oder gemeinsam mit anderen (fremden) Personen genutzt werden. Im Folgenden werden dafür die Begriffe Carsharing und Ridepooling verwendet. Die Integration solcher Mobilitätsdienstleistungen erfordert Anpassungen von Verkehrsnachfragemodellen, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

Neue Modi

Städtische Nachfragemodelle unterscheiden meist die Modi Fuß, Rad, ÖV und Pkw. Für letzteren Modus kann noch zwischen Pkw-Fahrer und Pkw-Mitfahrer differenziert werden. Diese Modi sind, im Gegensatz zu intermodalen Angeboten, weitgehend unabhängig voneinander, so dass die Moduswahl mit diskreten Entscheidungsmodellen des Typs Logit adäquat nachgebildet werden kann. Vollautomatisierte Fahrzeuge werden zu zusätzlichen Modi führen (Carsharing und vom ÖV unabhängiges Ridepooling) und können vorhandene Verkehrsangebote erweitern (Ridepooling integriert in den ÖV). Neue Modi lassen sich ohne softwaretechnische Erweiterungen leicht in vorhandene Modelle einfügen. Sie führen aber zu modelltechnischen Herausforderungen bei der Moduswahl, da sich nun einige Modi (z. B. Pkw und Carsharing) hinsichtlich ihrer Eigenschaften (Fahrzeit, Kosten, Komfort) ähneln. Das erfordert zusätzliche Informationen wie die Verfügbarkeit von Sharing-Angeboten oder die Bereitschaft, Fahrzeuge zu teilen.

Mobilitätswerkzeugwahl

Die Verfügbarkeit eines Pkw oder einer ÖV-Zeitkarte beeinflusst die Ziel- und Moduswahl. In vielen Modellen wird diese Verfügbarkeit nicht modelliert, sondern basierend auf einer externen Prognose oder einer Haushaltsbefragung vorgegeben. Vollautomatisierte Fahrzeuge werden das Teilen von Fahrzeugen und Fahrzeugfahrten vereinfachen. Sie können die Notwendigkeit reduzieren, einen privaten Pkw zu besitzen. Um Aussagen über den Pkw-Besitz in Abhängigkeit der Mobilitätsdienstleistungen machen zu können, sind Mobilitätswerkzeugwahlmodelle erforderlich.

Fahrtenbündelung für Ridepooling

Das Verkehrsangebot, das im Straßenverkehr durch das Straßennetz mit Kapazitäten und im ÖV durch Linienwege und Fahrpläne vorgegeben wird, ist unabhängig von der Nachfrage. Mobilitätsdienstleistungen, die auf Anfrage von Personen Servicefahrten durchführen, also ein On-Demand-Angebot darstellen, werden von der Nachfragestruktur zeitlich und räumlich beeinflusst. Ein Ziel von Ridepooling-Angeboten ist es, möglichst viele Fahrtwünsche mit möglichst wenigen Fahrzeugfahrten zu bedienen. Dazu müssen Personenfahrten zeitlich und räumlich zu Fahrzeugfahrten gebündelt werden. Dieser Bündelungsprozess muss in einem Nachfragemodell abgebildet werden.

Umlaufbildung für Fahrzeugflotten

Für eine möglichst gute Anpassung von Sharing-Angeboten an die Nachfragestruktur kann es sinnvoll sein, Fahrzeuge zwischen Servicefahrten neu zu positionieren. Mit vollautomatisierten Fahrzeugen ist dieser Vorgang, das Umsetzen, fahrerlos möglich. Dadurch können die Fahrzeuge besser ausgelastet werden. Die Umlaufbildung, die die Fahrten von Carsharing- und Ridepooling-Fahrzeugen zu Fahrzeugumläufen zusammenfasst, muss das Umsetzen vollautomatisierter Fahrzeuge berücksichtigen. Mit der Umlaufbildung werden die Anzahl erforderlicher Fahrzeuge und die anfallenden Leerkilometer ermittelt.

Methoden rund um die Integration von Carsharing- und Ridepooling-Angeboten in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle sind in RICHTER ET AL. (2019) zu finden. Dort wird auch zwischen direktem und intermodalem Ridepooling unterschieden. Für das intermodale Ridepooling, das als Ergänzung für den ÖV fungiert und die sogenannte erste oder letzte Meile bedient, werden Modellierungsmethoden vorgestellt. Die Arbeit diskutiert die Bündelung von Fahrtwünschen zu Servicefahrten und die Umlaufbildung für automatisierte, geteilte Fahrzeugflotten.

HARTLEB ET AL. (2021) stellen einen Algorithmus für die Umlaufbildung für automatisierte Fahrzeugflotten detailliert vor. Dieser ist in der Lage, sowohl mit ganzzahliger als auch nicht-ganzzahliger Nachfrage umzugehen und für zeitabhängige Nachfragematrizen die erforderliche Flottengröße sowie sämtliche erforderliche Leerfahrten zwischen den Servicefahrten zu ermitteln.

4.2 Modellierungsmethoden zur Leistungsfähigkeit

Dieses Kapitel stellt zwei Methoden vor, um Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen auf die Leistungsfähigkeit in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle zu integrieren. Beide Methoden erweitern auslastungsabhängige Fahrzeitermittlungsmodelle. Dabei wird die Berechnung der Auslastung modifiziert, welche dann in die Kapazitätsbeschränkungsfunktion (siehe Kapitel 2.2.2) eingeht.

Die erste Methode nimmt an, dass Kapazität und Nachfrage in Pkw-Einheiten angegeben werden. Die zweite Methode weicht von diesem Konzept ab und betrachtet Kapazität und Nachfrage in Fahrzeug- oder Zeiteinheiten. Beide Varianten der zweiten Methode sind ineinander überführbar und werden daher gemeinsam vorgestellt.

Der Aufbau folgt für alle Methoden dem Schema, zunächst das Ziel zu benennen. Es folgen Beschreibungen des Inputs und Outputs, der Methode an sich mit zugehörigen Annahmen, ein Beispiel und schließlich die Bewertung der Methode.

Die Methoden sind grundsätzlich für Stunden- und Tagesmodelle anwendbar. Die Beispiele zielen auf den Zeithorizont von einer Stunde ab. Diese Modelle lassen sich mit Umrechnungsfaktoren ineinander überführen. Ein möglicher Ablauf ist, die Kapazität mit dem HBS (FGSV (2015)) für eine Stunde abzuschätzen und diese Stundenkapazität auf die Tageskapazität hochzurechnen. Nach PINKOFSKY (2006) unterscheiden sich die Hochrechnungsfaktoren für Strecken mit unterschiedlich starker Ausprägung der Spitzenstunde im Tagesverlauf. Er schlägt folgende Wertebereiche für Faktoren in Abhängigkeit des Anteils des Verkehrsaufkommens der Spitzenstunde am Verkehrsaufkommen des ganzen Tages vor (PINKOFSKY (2006)):

- Gering: 12 bis 14,
- Mittel: 10 bis 12,
- Hoch: 8 bis 10.

Voraussetzung für die Methoden ist, dass ein zusätzliches Verkehrssystem für AV vorhanden ist. Die Methoden können für AV aller Automatisierungsstufen angewendet werden.

4.2.1 Kapazität und Nachfrage in Pkw-Einheiten

Das Konzept der Pkw-Einheiten, welches im Abschnitt 2.1.2 ausführlicher erläutert wird, sieht vor, dass verschiedene Fahrzeugtypen aufgrund ihrer unterschiedlichen Fahrverhalten und Fahrzeugeigenschaften mithilfe von Faktoren auf die vergleichbare, einheitliche Größe von Pkw-Einheiten umgerechnet werden. Fahrzeuge des Schwerverkehrs werden beispielsweise mit Faktoren größer eins zu Pkw-Einheiten konvertiert, da sie u. a. mehr Platz einnehmen.

Die Methode wurde in ähnlicher Form in SONNLEITNER ET AL. (2021) bereits veröffentlicht.

Ziel

Die Methode soll es ermöglichen, die Wirkungen von AV auf den Verkehrsablauf in makroskopischen Modellen abzubilden. Auslastungsabhängige Fahrzeitermittlungsmodelle können dann unterschiedliche Leistungsfähigkeiten von CV und AV berücksichtigen.

Input und Output

Die Methode benötigt PE-Faktoren für das Verkehrssystem AV als Input. Diese können von Eigenschaften der Straßenanlage und dem AV-Anteil abhängen, müssen es aber nicht. Für Straßenanlagen, auf denen AV nicht automatisiert fahren dürfen, muss im Netzmodell eine entsprechende Information vorhanden sein. Ferner wird vorausgesetzt, dass Nachfragedaten für alle zu berücksichtigenden Verkehrssysteme entsprechend im Modell vorhanden und hinterlegt sind.

Die Anwendung dieser Methode liefert Fahrtzeiten für den motorisierten Individualverkehr als Output, die den AV-Anteil und die jeweiligen PE-Faktoren berücksichtigen. Diese Fahrtzeiten beeinflussen wiederum die Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahl.

Methode und Annahmen

Die Methode erweitert das Konzept der Pkw-Einheiten, sodass AV einen eigenen PE-Faktor bzw. ein eigenes Set an PE-Faktoren erhalten. Damit beeinflussen sie nicht die Kapazität, die als konstante Größe betrachtet wird, sondern die Nachfrage in Form der Verkehrsstärke. Diese wirkt sich auf die Auslastung, und somit auf das Resultat der CR-Funktion aus. Es wird grundsätzlich angenommen, dass die ursprünglichen Parameter der CR-Funktionen auch mit der Präsenz von AV nach wie vor den Zusammenhang zwischen Auslastung und Fahrtzeit angemessen abbilden.

Formel (21) zeigt, wie sich die Auslastung berechnet, wenn es CV und AV gibt. Die Verkehrsstärke eines jeden Verkehrssystems wird dabei mit einem zugehörigen PE-Faktor multipliziert, um die Verkehrsstärke in PE zu erhalten. Die Wirkung von AV auf die Auslastung hängt dadurch direkt mit der Verkehrsstärke von AV zusammen. Unterschiedliche AV-Anteile wirken sich bei derselben Gesamtzahl von Fahrzeugen damit unterschiedlich aus. Der PE-Faktor für AV ist hier konstant.

$$x_s = \frac{q_{s,CV} \cdot f_{CV}^{PE} + q_{s,AV} \cdot f_{AV}^{PE}}{q_s^{\max}} \quad (21)$$

mit

x_s	Auslastung auf Netzelement s
$q_{s,CV}, q_{s,AV}$	Verkehrsstärken für CV und AV auf Netzelement s in Fzg/h
f_{CV}^{PE}, f_{AV}^{PE}	PE-Faktor für Verkehrssysteme CV und AV in PE pro Fahrzeug
q_s^{\max}	Kapazität von Netzelement s in PE/h

Unter der Annahme, dass die Leistungsfähigkeit von AV auch vom Typ der Straßenanlage abhängt, wird das PE-Konzept auf Straßen- und Kreuzungstypen (Autobahn oder Stadtstraße, planfreie oder plangleiche Kreuzung, signalisierte oder unsignalisierte Kreuzung) erweitert. Das führt zur Abhängigkeit des PE-Faktors für AV vom Netzelement, wie Formel (22) allgemein zeigt.

Dieser Ansatz macht spezifische PE-Faktoren für den Typ jeder Straßenanlage, die gesondert berücksichtigt werden soll, erforderlich. Auf einer beliebigen Straßenanlage wirkt sich jedes AV gleich auf die Auslastung aus. Der Zusammenhang zwischen AV-Anteil und Auslastung ist wie auch im obigen Fall linear.

$$x_s = \frac{q_{s,CV} \cdot f_{CV}^{PE} + q_{s,AV} \cdot f_{s,AV}^{PE}}{q_s^{\max}} \quad (22)$$

mit

$f_{s,AV}^{PE}$ PE-Faktor für AV auf Netzelement s in PE pro Fahrzeug

Es ist auch vorstellbar, dass der Einfluss von AV auf die Auslastung unproportional zum Anteil verläuft. Im Falle eines niedrigen AV-Anteils ist der Einfluss eines einzelnen AV beispielsweise kleiner als in Fällen mit einer höheren Durchdringungsrate. Um dies abzubilden, muss der PE-Faktor vom AV-Anteil abhängen, wie Formel (23) zeigt. Wie dieser funktionale Zusammenhang aussehen könnte, ist in Formel (24) zu sehen. Der PE-Faktor ergibt sich dabei aus den über den AV-Anteil gemittelten PE-Faktoren für einen AV-Anteil von jeweils 0 % und 100 %. Diese Funktion dient als grundlegendes Beispiel. Es ist die Aufgabe des Modellierers, eine geeignete Funktion zu finden, die den Zusammenhang zwischen Anteil von und PE-Faktor für AV möglichst gut darstellt.

Die Bestimmung eines PE-Faktors für AV bei 0 % AV erscheint paradox. Näherungsweise kann dieser PE-Faktor als repräsentativ für das erste und einzige automatisierte Fahrzeug, das das Netzelement nutzt, interpretiert werden.

$$x_s = \frac{q_{s,CV} \cdot f_{CV}^{PE} + q_{s,AV} \cdot f_{s,AV}^{PE}(p_{s,AV})}{q_s^{\max}} \quad (23)$$

$$f_{s,AV}^{PE}(p_{s,AV}) = f_{s,AV}^{PE,0\%} + p_{s,AV} \cdot (f_{s,AV}^{PE,100\%} - f_{s,AV}^{PE,0\%}) \quad (24)$$

mit

$p_{s,AV}$ AV-Anteil auf Netzelement s

$f_{s,AV}^{PE}(p_{s,AV})$ PE-Faktor für AV auf Netzelement s in PE pro Fahrzeug

$f_{s,AV}^{PE,0\%}$ PE-Faktor für AV auf Netzelement s für einen AV-Anteil von 0 %

$f_{s,AV}^{PE,100\%}$ PE-Faktor für AV auf Netzelement s für einen AV-Anteil von 100 %

Beispiel

Zur Veranschaulichung werden Fahrtzeiten für eine Beispielstrecke von 1 km Länge und einem Geschwindigkeitslimit von 100 km/h für einen belasteten Zustand ohne und mit AV berechnet. Die Fahrtzeit im unbelasteten Zustand auf dieser Strecke beträgt 36 s.

Eine Kalibrierung der CR-Funktion des Typs BPR für die betrachtete Beispielstrecke hat gezeigt, dass die in Formel (25) enthaltenen Parameter den Zusammenhang zwischen Auslastung und Fahrtzeit im belasteten Zustand gut wiedergeben.

$$f^{BPR}(q_s) = t_s^0 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \left(\frac{q_s}{q_s^{\max}} \right)^3 \right) \quad (25)$$

mit

t_s^0 Fahrtzeit auf Netzelement s für $q_s = 0$ in Sekunden

$f^{BPR}(q_s)$ BPR-Funktion mit Funktionsparametern $\alpha = 0,8$ und $\beta = 3$

Mit einer Belastung von 1.500 CV, die mit einem herkömmlichen PE-Faktor von 1,0 in die Berechnung eingehen, und einer Streckenkapazität von 2.000 PE/h ergibt sich eine Auslastung von 0,75. Die Fahrtzeit im belasteten Zustand beträgt damit 48,15 s (siehe (26)).

$$x_s = \frac{q_{s,CV} \cdot f_{CV}^{PE}}{q_s^{\max}}$$

$$x_s = \frac{1500 \cdot 1,0}{2000} = 0,75 \quad (26)$$

$$t_s^{BPR} = 36 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot 0,75^3 \right) = 48,15$$

Nun ändert sich die Nachfragezusammensetzung. Die Strecke wird nun von 1.000 CV und 500 AV befahren. Als PE-Faktor für die Beispielstrecke wurde der Wert 0,8 durch mikroskopische Verkehrsflusssimulationen ermittelt. Die Auslastung reduziert sich auf 0,7 und führt zu einer Fahrtzeit im belasteten Zustand von 45,88 s (siehe (27)).

$$x_s = \frac{q_{s,CV} \cdot f_{CV}^{PE} + q_{s,AV} \cdot f_{s,AV}^{PE}}{q_s^{\max}}$$

$$x_s = \frac{1000 \cdot 1,0 + 500 \cdot 0,8}{2000} = 0,7 \quad (27)$$

$$t_s^{BPR} = 36 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot 0,7^3 \right) = 45,88$$

Eine differenzierte Kalibrierung mit Verkehrssimulationen, bei denen der AV-Anteil variiert wird, zeigen, dass der PE-Faktor für AV vom AV-Anteil abhängt. Der Faktor verläuft zwischen 0,9 für 0 % AV und 0,6 für 100 % AV. Diese beiden Wertepaare stellen den Input für die Berechnung der Fahrtzeit für sämtliche zu untersuchende AV-Anteile dar. Für obige Verkehrsstärken ergibt sich ein AV-Anteil von 0,33 und ein PE-Faktor für AV von 0,8 (siehe (28)). Mit diesem Faktor wird die Fahrtzeit identisch zu voriger Beispielrechnung bestimmt.

$$\begin{aligned}
 p_{s,AV} &= \frac{q_{s,AV}}{q_{s,CV} + q_{s,AV}} \\
 p_{s,AV} &= \frac{500}{1000 + 500} = 0,33 \\
 f_{s,AV}^{PE}(p_{s,AV}) &= f_{s,AV}^{PE,0\%} + p_{s,AV} \cdot (f_{s,AV}^{PE,100\%} - f_{s,AV}^{PE,0\%}) \\
 f_{s,AV}^{PE}(0,33) &= 0,9 + 0,33 \cdot (0,6 - 0,9) = 0,8
 \end{aligned} \tag{28}$$

Bewertung

Die Methode weist eine hohe Flexibilität auf, weil der PE-Faktor konstant, nur vom Typ der Straßenanlage oder auch noch vom AV-Anteil abhängig stellvertretend für die Leistungsfähigkeit von AV eingesetzt werden kann. Das Einbinden über PE-Faktoren bedeutet automatisch, dass dem AV-Anteil bezüglich der Größenordnung des Einflusses Rechnung getragen wird, da die Verkehrsstärke von AV damit multipliziert wird.

Es ist unklar, wie die Leistungsfähigkeit auf verschiedenen Straßenanlagen ausfällt und inwiefern sie sich in Abhängigkeit des AV-Anteils unterscheidet. Der Einsatz vieler verschiedener Faktoren erfordert die Bestimmung dieser (z. B. durch mikroskopische Verkehrsflusssimulationen) oder das Treffen vieler Annahmen. Ersteres ist mit großem Aufwand und letzteres mit großen Unsicherheiten verbunden. Ebenfalls unklar bleibt, ob die Formen der CR-Funktionen mit ihren ursprünglichen Parametern mit Erscheinen von AV weiterhin passende Fahrtzeiten zu den Auslastungen ermitteln.

Ein technisches Risiko besteht darin, dass die zum Einsatz kommende Modellierungssoftware nicht geeignet ist, derlei variable PE-Faktoren im Modell bzw. innerhalb der Umlegung zu berücksichtigen. Dies kann Behelfslösungen wie zusätzliche Skripte oder Attribute erforderlich machen. Die Anwendung der Methode für das Verkehrsnachfragemodell des Verbands Region Stuttgart (VRS) in Abschnitt 5.4.4 zeigt einen möglichen Lösungsansatz für die Umsetzung in der Software VISUM.

Ein mögliches Problem des PE-Konzepts an sich ist, dass der Begriff Pkw-Einheit zukünftig als nicht mehr passend betrachtet werden könnte, da das Konzept auf die Einheit konventioneller Pkw abzielt. Wenn AV eines Tages die Fahrzeugflotte dominieren, könnte es kontraintuitiv sein, Kapazitäten und Verkehrsstärken in konventionellen Pkw-Einheiten pro Stunde anzugeben.

4.2.2 Kapazität und Nachfrage in Fahrzeug- oder Zeiteinheiten

Die Ansätze der zweiten Modellierungsmethode zum Abbilden der Leistungsfähigkeit von AV sind abgeleitet aus den Überlegungen von FRIEDRICH (2015) und WAGNER (2017). Sie machen sich die fundamentalen Zusammenhänge zwischen

Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlerer Geschwindigkeit zunutze. Die Methode wurde in ähnlicher Form in FRIEDRICH ET AL. (2019b) bereits veröffentlicht.

Ziel

Die Methode soll es ermöglichen, die Wirkungen von AV auf den Verkehrsablauf in makroskopischen Modellen abzubilden. Auslastungsabhängige Fahrzeitermittlungsmodelle können dann unterschiedliche Leistungsfähigkeiten von CV und AV berücksichtigen.

Input und Output

Als Input werden Nettozeitlücken benötigt, die alle Verkehrssysteme mindestens einhalten. Diese können ggfs. auch vom Verkehrssystem des Vorderfahrzeugs abhängen und für verschiedene Typen von Straßenanlagen variieren. Die Nettozeitlücke ist der zeitliche Abstand zwischen Überfahren eines Querschnitts der Hinterkante des Vorderfahrzeugs bis zum Erreichen desselben Querschnitts der Vorderkante des Folgefahrzeugs. Zusätzlich werden die Fahrzeuglängen aller Verkehrssysteme benötigt. Es wird ebenfalls vorausgesetzt, dass Nachfragedaten für alle zu berücksichtigenden Verkehrssysteme entsprechend im Modell vorhanden und hinterlegt sind.

Für Straßenanlagen, auf denen AV nicht automatisiert fahren dürfen, muss im Netzmodell eine entsprechende Information vorhanden sein.

Die Anwendung dieser Methode liefert Fahrzeiten für den motorisierten Individualverkehr als Output, die den AV-Anteil und die jeweiligen PE-Faktoren berücksichtigen. Diese Fahrzeiten beeinflussen wiederum die Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahl.

Methode und Annahmen

Für beide Ansätze, Kapazität und Nachfrage in Fahrzeug- oder in Zeiteinheiten, wird mit den Nettozeitlücken, den Fahrzeuglängen und dem AV-Anteil für eine angenommene, mittlere Geschwindigkeit die durchschnittliche Bruttozeitlücke für ein Netzelement bestimmt. Die Bruttozeitlücke repräsentiert den Zeitbedarf für ein Fahrzeug, der nicht unterschritten werden kann. Mithilfe dieser wird die Auslastung berechnet, die dann die Eingangsgröße für eine CR-Funktion bildet.

Im ersten Ansatz bleibt die Nachfrage, die ohnehin modellseitig als Anzahl von Fahrzeugen verschiedener Verkehrssysteme vorliegt, unverändert bestehen. Jedoch wird die Kapazität von Straßenanlagen in Abhängigkeit der Fahrzeugkomposition angepasst. Kapazität wird hierbei synonym zur größtmöglichen Verkehrsstärke für eine gegebene, mittlere Geschwindigkeit genutzt. Formel (29) zeigt die Zustandsgleichung mit der Abhängigkeit von maximaler Verkehrsstärke und Dichte von der mittleren Geschwindigkeit. Die maximale Verkehrsdichte ergibt sich nach Formel (30) aus dem Kehrwert der Länge, die ein Fahrzeug insgesamt bei gegebener Geschwindigkeit durchschnittlich benötigt.

$$q_s^{\max}(v_s) = k_s^{\max}(v_s) \cdot v_s \quad (29)$$

$$k_s^{\max}(v_s) = \frac{1}{v_s \cdot t_s^{\text{mean}}(p_{s,AV}) + l_s^{\text{mean}}} \quad (30)$$

$$t_s^{\text{mean}}(p_{s,AV}) = p_{s,AV}^2 \cdot t_{s,AV-AV} + (1 - p_{s,AV}^2) \cdot t_{s,other} \quad (31)$$

$$t_s^{\text{mean}}(p_{s,AV}) = p_{s,AV}^2 \cdot t_{s,AV-AV} + p_{s,AV} \cdot (1 - p_{s,AV}^2) \cdot t_{s,AV-CV} + (p_{s,AV} - 2p_{s,AV}^2 + 1) \cdot t_{s,other} \quad (32)$$

mit

$q_s^{\max}(v_s)$	maximale Verkehrsstärke für Geschwindigkeit v_s in Fzg/h
$k_s^{\max}(v_s)$	maximale Dichte bei Geschwindigkeit v_s auf Netzelement s in Fzg/km
$t_s^{\text{mean}}(p_{s,AV})$	durchschnittliche Nettozeitlücke für AV-Anteil $p_{s,AV}$ auf s in h/Fzg
l_s^{mean}	durchschnittliche Fahrzeuglänge auf Netzelement s in km/Fzg
$t_{s,AV-AV}$	Nettozeitlücke zwischen AV und AV auf Netzelement s in h
$t_{s,other}$	Nettozeitlücke für alle anderen Verkehrssysteme auf s in h
$t_{s,AV-CV}$	Nettozeitlücke zwischen AV und CV auf Netzelement s in h

Unter der Annahme, dass AV nur einen geringen Folgeabstand einhalten, wenn das Vorderfahrzeug ebenfalls ein AV ist, lässt sich die durchschnittliche Nettozeitlücke mit Formel (31) berechnen. Sollte ein AV beispielsweise auch hinter CV eine etwas kürzere Zeitlücke einhalten, die allerdings nicht der Zeitlücke entspricht, die AV hinter AV einhalten, wird die Berechnungsvorschrift (siehe Formel (32)) etwas komplizierter. Mit weiteren Verkehrssystemen und unterschiedlichen Zeitlücken in Abhängigkeit des Vorderfahrzeugs steigt die Komplexität der Formel, basiert jedoch stets auf den Wahrscheinlichkeiten für gewisse Kombinationen von Folgefällen zwischen Verkehrssystemen. Diese Wahrscheinlichkeiten hängen von den Anteilen jedes Verkehrssystems und damit auch vom AV-Anteil ab.

Für die Behandlung von Kapazität und Nachfrage in Zeiteinheiten wird die Kapazität als konstanter Wert behandelt. Hier wird nun die ermittelte durchschnittliche Bruttozeitlücke mit der Anzahl der Fahrzeuge multipliziert, um den gesamten Zeitbedarf der Nachfrage auf einem Netzelement zu bestimmen. Das Einsetzen der Kapazität aus Formel (29) in die Berechnungsvorschrift der Auslastung ergibt Formel (33). Mit der Verkehrsdichte, wie in Formel (30) gezeigt, resultiert Formel (34) für die Auslastung.

$$x_s = \frac{q_s}{k_s^{\max}(v_s) \cdot v_s} \quad (33)$$

$$x_s = q_s \cdot \left(t_s^{\text{mean}}(p_{s,AV}) + \frac{l_s^{\text{mean}}}{v_s} \right) \quad (34)$$

$$x_s = \frac{3600 \cdot q_s \cdot \left(t_s^{\text{mean}}(p_{s,AV}) + \frac{l_s^{\text{mean}}}{v_s} \right)}{3600} \quad (35)$$

Das Erweitern dieser Formel mit 3.600 s/h (siehe Formel (35)) ermöglicht eine anschauliche Interpretation für den Zeithorizont einer Stunde. Der Zähler repräsentiert die Nachfrage und der Nenner die Kapazität, jeweils in Sekunden. Eine Straßenanlage stellt innerhalb von einer Stunde eine Zeit von 3.600 s als Kapazität zur Verfügung. Diese Kapazität kann durch mehrere Fahrstreifen erhöht oder durch LSA reduziert werden.

Beispiel

Die Berechnung der Auslastung und damit der Fahrtzeiten mit dem Konzept, dass Kapazität und Nachfrage in Zeiteinheiten verwendet werden, soll mit derselben Beispielsecke aus Kapitel 4.2.1 erfolgen. Für die einstreifige Strecke ist ein Geschwindigkeitslimit von 100 km/h gesetzt und die Fahrtzeit im unbelasteten Zustand beträgt 36 s.

Zunächst folgt die Berechnung für den Fall ohne AV. Die Belastung beträgt 1.500 CV, die eine durchschnittliche Fahrzeuglänge (inklusive Stillstandsabstand) von 7 m aufweisen und eine Nettozeitlücke von 1,5 s einhalten. Da es nur ein Verkehrssystem gibt, sind das auch die durchschnittlichen Werte. Das Einsetzen dieser Werte in Formel (34) ergibt eine Auslastung von 0,73. Mit der CR-Funktion des Typs BPR aus Formel (25) ergibt sich eine Fahrtzeit von 47,20 s (siehe (36)).

$$x_s = 1500 \cdot \left(\frac{1,5}{3600} + \frac{0,007}{100} \right) = 0,73 \quad (36)$$

$$t_s^{\text{BPR}} = 36 \cdot (1 + 0,8 \cdot 0,73^3) = 47,20$$

Im zweiten Fall teilt sich die Belastung in 1.000 CV und 500 AV auf, was einen AV-Anteil von 0,33 bedeutet. AV halten nur dann eine kürzere Folgezeitlücke ein, wenn sie hinter einem AV fahren. Die Nettozeitlücke beträgt dann 0,8 s. Ihre Länge stimmt mit der von CV überein, sodass sich die mittlere Fahrzeuglänge nicht ändert. Die durchschnittliche Nettozeitlücke wird mit Formel (31) bestimmt und beträgt 1,42 s. Die Berechnung von Auslastung und Fahrtzeit verläuft analog zum Fall ohne AV und ist in (37) aufgeführt. Mit der Auslastung von 0,70 ergibt sich eine Fahrtzeit von 45,78 s im belasteten Zustand.

$$\begin{aligned}
 t_s^{mean}(p_{s,AV}) &= 0,33^2 \cdot 0,8 + (1 - 0,33^2) \cdot 1,5 = 1,42 \\
 x_s &= (1000 + 500) \cdot \left(\frac{1,42}{3600} + \frac{0,007}{100} \right) = 0,70 \\
 t_s^{BPR} &= 36 \cdot (1 + 0,8 \cdot 0,70^3) = 45,78
 \end{aligned}
 \tag{37}$$

Bewertung

Beide Ansätze der vorgestellten Modellierungsmethode gehen von Vereinfachungen aus, um Auslastungen zu berechnen. Kapazität und Nachfrage basieren dabei hauptsächlich auf zeitlichen Folgeabständen. Effekte auf den Verkehrsablauf, die nicht durch das Fahrzeugfolgeverhalten beschrieben werden können (z. B. Fahrstreifenwechsellverhalten), werden vernachlässigt. Außerdem wird für die Berechnungen unterstellt, dass der Verkehrszustand stabil ist und die Fahrzeugpopulation die angenommene Geschwindigkeit einhält. Nettozeitlücken müssten entsprechend auch unter diesen Umständen ermittelt werden.

Die Methode bietet die Flexibilität, verschiedene Nettozeitlücken für bestimmte Fahrzeugfolgefälle anzunehmen und diese auch abhängig vom Typ der Straßenanlage zu setzen. Die durchschnittliche Nettozeitlücke wird aufgrund der Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Folgefälle berechnet. Der Einfluss des AV-Anteils lässt sich damit vereinfacht abbilden.

Für den Ansatz mit Fahrzeugeinheiten ist die Kapazität schwieriger zu interpretieren. Sie ist abhängig von der Fahrzeugpopulation und Geschwindigkeit und damit nicht konstant, folgt aber auch nicht der Annahme der stochastischen Kapazität, die auch für dieselben Nachfragezusammensetzungen unterschiedliche maximale Verkehrsstärken zulässt. Die Interpretation der Kapazität als konstante Zeitdauer, die eine Straßenanlage der Nachfrage zur Verfügung stellt, ist klarer gehalten, aber möglicherweise für Stundenmodelle intuitiver als für Ganztagesmodelle.

Die Ansätze unterliegen wie auch die Methode, die Pkw-Einheiten nutzt, der Annahme, dass die Formen der CR-Funktionen mit ihren ursprünglichen Parametern mit Erscheinen von AV weiterhin passende Fahrtzeiten zu den Auslastungen ermitteln können.

Technische Risiken bestehen erneut darin, dass die zum Einsatz kommende Modellierungssoftware nicht geeignet ist, weil durchschnittliche Zeitlücken stets während der Umlegung neu berechnet werden müssen. Dies kann Behelfslösungen wie zusätzliche Skripte oder Attribute erforderlich machen.

4.3 Modellierungsmethode zur Zeitwahrnehmung

Verkehrsnachfragemodelle bilden die Entscheidungsprozesse nach, die zu Fahrten im Verkehrsnetz führen. Für jede Wahlsituation wählen die Reisenden aus einer Menge von

Alternativen aus. Der Nutzen einer Alternative wird mit einer Nutzenfunktion bestimmt, die die Eigenschaften der Person (Personengruppe) und des Reisezwecks (Aktivität) berücksichtigen kann. Nutzenfunktionen beinhalten verschiedene Zeitkomponenten (Zugang, Abgang, Fahrtzeit, Warten), Kosten und Reisekomfort. Die Zeitkomponenten werden unterschiedlich wahrgenommen. Deshalb wird in der Nutzenfunktion jede Zeitkomponente mit einem spezifischen (Aufwandsempfindlichkeits-)Parameter gewichtet. Für bereits verfügbare Verkehrsmittel können diese Parameter mithilfe von Beobachtungen aus Mobilitätserhebungen geschätzt werden. Die Bestimmung des Werts der Fahrtzeit für Fahrten mit AV erfordert Annahmen (Zeitwahrnehmung wie in Fernbahn) oder Befragungen zu Präferenzen. Erkenntnisse aus Revealed- und Stated-Preference-Befragungen zu diesem Thema werden in Kapitel 3.3.3 erörtert.

Gemäß der Literaturlauswertung ist davon auszugehen, dass sich die Wahrnehmung der Fahrtzeit ändert, wenn Personen fahrfremde Tätigkeiten während der Fahrt in einem AV ausüben können. Das trifft für vollautomatisierte Fahrzeuge zu, kann aber auch auf hochautomatisierte Fahrzeuge übertragen werden, die weiterhin eine Person mit Fahrerlaubnis benötigen, aber dennoch innerhalb der ODD automatisiert fahren können und generell die nutzende Person nicht als Rückfallebene benötigen.

Die Methode wurde in ähnlicher Form in SONNLEITNER ET AL. (2021) bereits veröffentlicht.

Ziel

Die Methode soll auf einfache Art und Weise eine veränderte Wahrnehmung der Fahrtzeit in automatisierten Fahrzeugen in einem Verkehrsnachfragemodell abbilden. Die veränderte Wahrnehmung beeinflusst die Attraktivität des zugehörigen Modus und wirkt damit auf die Entscheidungsstufen der Ziel-, Modus- und Routenwahl.

Input und Output

Für die Anwendung der Methode wird ein kalibriertes Verkehrsnachfragemodell benötigt, das mindestens die Modi Fuß, Rad, ÖV und Pkw unterscheidet. Der Modus Pkw oder Pkw-Fahrer umfasst die zwei Verkehrssysteme CV und AV. Im Netzmodell muss definiert sein, auf welchen Straßenanlagen AV automatisiert fahren dürfen. Ferner wird vorausgesetzt, dass Nachfragedaten für alle zu berücksichtigenden Verkehrssysteme entsprechend im Modell vorhanden und hinterlegt sind. Damit ist der AV-Anteil über die gesamte Fahrzeugflotte bekannt. Schließlich ist der Parameter für die Wahrnehmung der Fahrtzeit in AV im automatisierten Fahrbetrieb als zentraler Input notwendig. Optional kann ein Grenzwert vorgegeben werden, der eine Wahrnehmungsschwelle für empfundene Zeitvorteile repräsentiert.

Als Ergebnis liefert die Methode angepasste empfundene Fahrtzeiten für das zugehörige Verkehrssystem und den Verkehrsmodus. Für die Ziel- und Moduswahl geht diese über eine Kenngrößenmatrix des Modus ein. In der Umlegung wirkt die empfundene Fahrtzeit auf Ebene der Netzelemente auf die Routenwahl des Verkehrssystems.

Methode und Annahmen

Der Teil der Fahrzeit, in der die ursprünglich fahrende Person das Fahrzeug nicht selbst steuern muss, wird im Folgenden als automatisierte Fahrzeit bezeichnet. Auch wenn AV nicht vollautomatisiert sind, kann für die automatisierte Fahrzeit eine entsprechende Anpassung vorgenommen werden, die sich nur auf diesen Anteil bezieht und nicht für die gesamte Fahrzeit wirkt.

Die Methode nimmt an, dass AV ein zusätzliches Verkehrssystem für den Modus Pkw darstellen und die Nutzung den Besitz einer Fahrerlaubnis voraussetzt. Im Abschnitt Bewertung wird auf nötige Anpassungen hingewiesen, sodass die Methode auch für vollautomatisierte Fahrzeuge angewendet werden kann.

Grundsätzlich gilt, dass die Fahrzeiten von AV auf allen Netzelementen identisch zu denen von CV sind. Für die tatsächliche Fahrzeit spielt es keine Rolle, ob das Fahrzeug automatisiert oder manuell gefahren wird. Bei der Wahrnehmung der Fahrzeit wird jedoch diesbezüglich unterschieden. Die empfundene Fahrzeit für AV setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: der manuellen Fahrzeit, die wie die Fahrzeit von CV wahrgenommen wird, und der automatisierten Fahrzeit, die mit einem neuen Parameter multipliziert wird. Um diesen Parameter ausschließlich auf die automatisierte Fahrzeit anzuwenden, muss diese separat zur manuellen Fahrzeit im Modell erfasst werden. Für die Fahrzeiten konventioneller Fahrzeuge ist keine Anpassung notwendig.

Die Gleichungen (38) und (39) zeigen, wie die empfundenen Fahrzeiten aus tatsächlichen Fahrzeiten mithilfe von Wahrnehmungsparametern für die Ziel- und Moduswahl berechnet werden. Ausgehend von der Annahme, dass für manuelle Fahrzeiten die wahrgenommene der tatsächlichen Fahrzeit entspricht ($\beta_t^{n-autom} = 1$), stellt der Wahrnehmungsparameter für automatisierte Fahrzeit β_t^{autom} das Verhältnis der Zeitwahrnehmung von automatisierter zu manueller Fahrzeit dar.

$$t_{odr}^{CV,perc} = \beta_t^{n-autom} \cdot t_{odr}^{CV} \quad (38)$$

$$t_{odr}^{AV,perc} = \beta_t^{n-autom} \cdot (t_{odr}^{AV} - t_{odr}^{AV,autom}) + \beta_t^{autom} \cdot t_{odr}^{AV,autom} \quad (39)$$

mit

$t_{odr}^{CV,perc}$, $t_{odr}^{AV,perc}$	empfundene Fahrzeiten mit CV bzw. AV auf r von o nach d
t_{odr}^{CV} , t_{odr}^{AV}	Fahrzeiten mit CV bzw. AV auf r von o nach d
$t_{odr}^{AV,autom}$	Automatisierte Fahrzeit mit AV auf r von o nach d
$\beta_t^{n-autom}$	Wahrnehmungsparameter nichtautomatisierte Fahrzeit, einheitenlos
β_t^{autom}	Wahrnehmungsparameter automatisierte Fahrzeit, einheitenlos

Aus den empfundenen Fahrzeiten der Verkehrssysteme CV und AV werden gewichtete mittlere empfundene Fahrzeiten für den Modus Pkw in Form einer Matrix berechnet. Die Gewichtung erfolgt nach Formel (40) anhand des AV-Anteils in der Fahrzeugflotte der

sich im Privatbesitz befindlichen Fahrzeuge. Das Ergebnis $t_{od}^{Car,perc}$ stellt die Komponente dar, die dann in Nutzenfunktionen die bisherige Kenngröße empfundene Fahrzeit von CV ersetzt. Die Modellstufen Ziel- und Moduswahl greifen dann zur Berechnung des Nutzens auf diese mittlere, empfundene Fahrzeitenmatrix zurück. Formel (41) zeigt die Berechnung des Nutzens aus der empfundenen Fahrzeit. Als Beispiel für eine allgemeine Nutzenfunktion in der Moduswahl sei auf Formel (12) verwiesen.

$$t_{od}^{Car,perc} = (1 - p_{AV}) \cdot t_{od}^{CV,perc} + p_{AV} \cdot t_{od}^{AV,perc} \quad (40)$$

$$v_{t,god}^{Car} = \beta_{t,g} \cdot t_{od}^{Car,perc} \quad (41)$$

mit

$t_{od}^{Car,perc}$	Gewichtete empfundene Fahrzeit für den Modus Pkw von Quelle o zu Ziel d
p_{AV}	AV-Anteil in der Fahrzeugflotte
$t_{od}^{CV,perc}$, $t_{od}^{AV,perc}$	Empfundene Fahrzeiten für CV und AV von Quelle o zu Ziel d
$v_{t,god}^{Car}$	Nutzen aus Fahrzeiten für Nachfragegruppe g mit dem Modus Pkw von Quelle o nach Ziel d
$\beta_{t,g}$	Aufwandsempfindlichkeitsparameter für empfundene Fahrzeit von Nachfragegruppe g in 1/Zeiteinheit

Abbildung 13 zeigt den schematischen Aufbau von Fahrzeiten auf Routenebene bis hin zur gewichteten, mittleren empfundenen Fahrzeitenmatrix für den Modus.

Für den Widerstand auf Netzelementebene, der für die Routenwahl benötigt wird, erfolgt die Berechnung anhand der Gleichungen (42) und (43). Nur wenn ein Netzelement automatisiert befahren wird, wirkt der zusätzliche Wahrnehmungsparameter. Das gleichzeitige Berücksichtigen von automatisierter und manueller Fahrzeit von AV entfällt hier, weil davon ausgegangen wird, dass auf einem Netzelement nicht beides möglich ist.

$$w_{t,s}^{CV} = \beta_{t,s} \cdot t_s^{CV} \quad (42)$$

$$w_{t,s}^{AV} = \beta_{t,s} \cdot \begin{cases} t_s^{AV} & , t_s^{AV} \neq t_s^{AV,autom} \\ \beta_t^{autom} \cdot t_s^{AV} & , t_s^{AV} = t_s^{AV,autom} \end{cases} \quad (43)$$

mit

$w_{t,s}^{CV}$, $w_{t,s}^{AV}$	Widerstand aus Fahrzeiten für CV bzw. AV auf Netzelement s
t_s^{CV} , t_s^{AV}	Fahrzeiten mit CV bzw. AV auf Netzelement s
$t_s^{AV,autom}$	automatisierte Fahrzeit von AV auf Netzelement s
$\beta_{t,s}$	netzelementspezifischer Parameter für Fahrzeit in 1/Zeiteinheit

Mit dem netzelementspezifischen Parameter können Fahrzeiten angepasst werden, um auch schon unabhängig vom automatisierten Fahren gewissen Unterschieden in der Wahrnehmung der Zeit auf bestimmten Netzelementen Rechnung zu tragen. Neben

dem Widerstand aus Fahrzeiten kann die Widerstandsfunktion auch noch Komponenten zu Kosten oder der Länge von Netzelementen enthalten (FRIEDRICH ET AL. (2019a)).

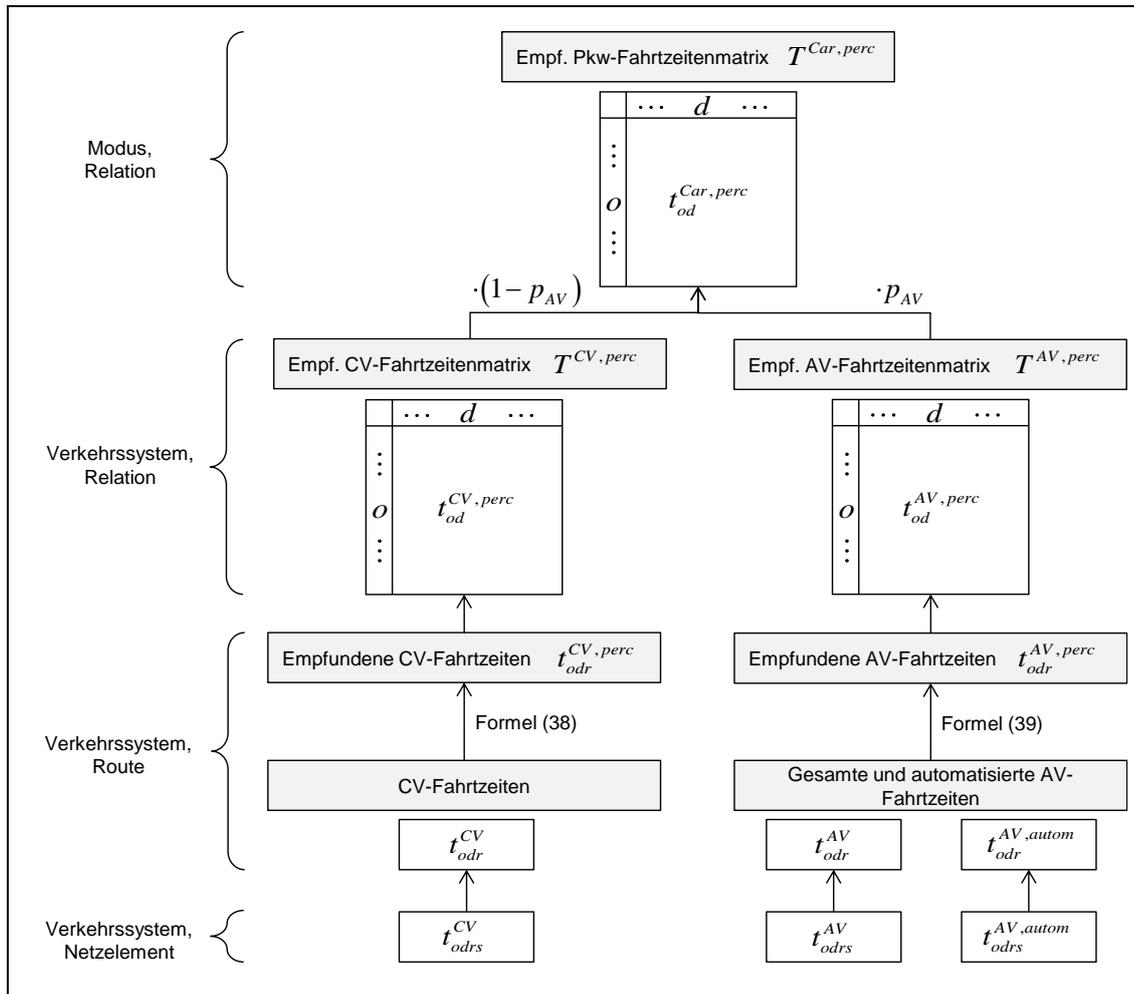


Abbildung 13: Verlauf von Fahrzeiten auf Netzelementen bis zur empfundenen Fahrzeitenmatrix für den Modus Pkw.

Um die Annahme abbilden zu können, dass für kurze Dauern automatisierter Fahrzeit keine relevanten Änderungen in der Zeitwahrnehmung auftreten, wird die Methode erweitert. Durch eine Modifikation der Gleichung (39) lässt sich ein Grenzwert für die automatisierte Fahrzeit einbinden. Formel (44) zeigt die zugehörige Berechnungsvorschrift. Automatisierte Fahrzeiten, die kürzer als die Dauer sind, die der Grenzwert angibt, werden unverändert belassen und damit wie manuelle Fahrzeit behandelt. Die automatisierte Fahrzeit, die den Grenzwert übersteigt, wird wie gehabt mit dem zusätzlichen Parameter multipliziert.

$$t_{odr}^{AV,perc} = \beta_t^{n-autom} \left(t_{odr}^{AV} - \max(0; t_{odr}^{AV,autom} - t^l) \right) + \beta_t^{autom} \cdot \max(0; t_{odr}^{AV,autom} - t^l) \quad (44)$$

mit

t^l Grenzwert für die Wahrnehmung automatisierter Fahrzeit

Diese empfundene Fahrzeit geht dann wie gehabt in die Nutzenberechnung für die Ziel- und Moduswahl ein. Soweit es softwarespezifisch möglich ist, sollte der Grenzwert auf für die Berechnung des Widerstands für die Routenwahl berücksichtigt werden. Ein Lösungsvorschlag zur Umsetzung in VISUM befindet sich in Kapitel 5.5.

Abbildung 14 zeigt den schematischen Verlauf der empfundenen Fahrzeit für AV in Abhängigkeit des Grenzwerts und dem Parameter für die Zeitwahrnehmung. Der Kurvenverlauf der Abbildung nimmt vereinfachend an, dass die gesamte Fahrzeit der Route automatisiert ist ($t_{odr}^{AV} = t_{odr}^{AV,autom}$) und die wahrgenommene manuelle Fahrzeit der tatsächlichen Fahrzeit entspricht ($\beta_i^{n-autom} = 1$).

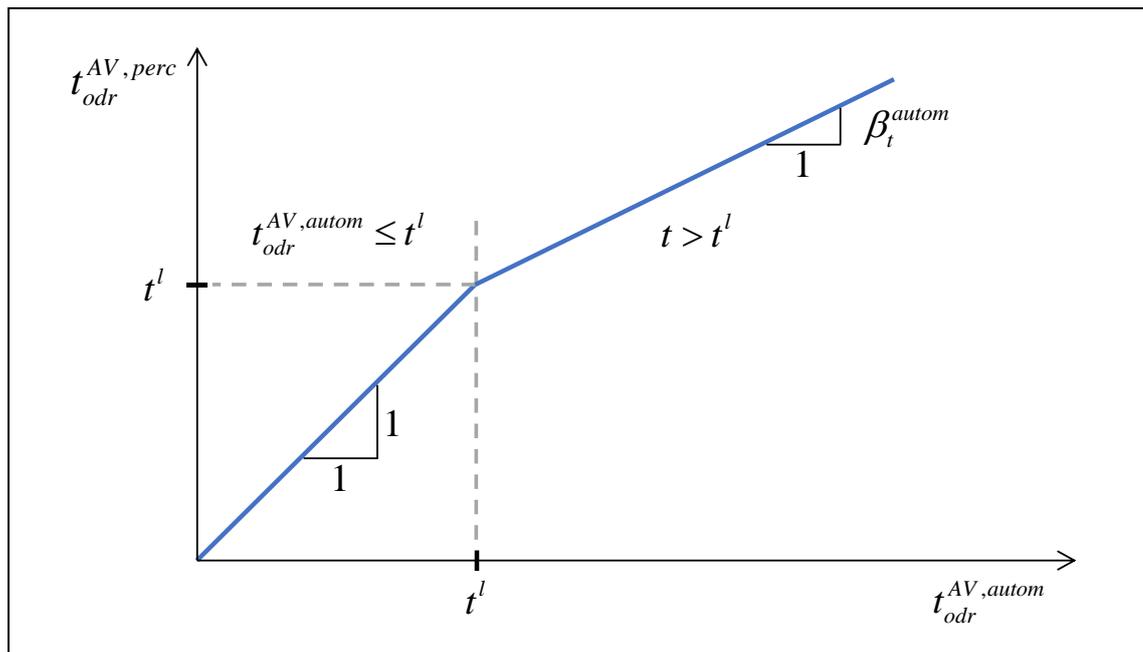


Abbildung 14: Schematischer Verlauf der empfundenen Fahrzeit für AV.

Wenn möglich, sollten die automatisierten Fahrzeiten aller automatisierten Fahrtabschnitte, die durch manuelles Fahren unterbrochen werden, separat im Modell bestimmt und gespeichert werden. Dann kann sichergestellt werden, ob sich die automatisierte Fahrzeit aus vielen kurzen automatisierten Fahrtabschnitten zusammensetzt, von denen die Fahrzeuginsassen nicht in gleichem Maße profitieren würden, wie wenn sie einen langen Fahrtabschnitt im automatisierten Fahrmodus verbringen.

Die Fahrzeiten der automatisierten Fahrtabschnitte sollten in der Berechnung dann einzeln mit dem Grenzwert verglichen und entsprechend modifiziert werden, um die gesamte, empfundene Fahrzeit für AV zu erhalten.

Beispiel

Die Beispielrechnung basiert auf dem in Abbildung 15 gezeigten Netzmodell mit Fahrzeiten für eine Quelle-Ziel-Relation. Es wird nur eine Route betrachtet, die von 600 CV und 400 AV vom Quellbezirk zum Zielbezirk befahren wird. Netzelemente werden

danach unterschieden, ob sie automatisiert befahrbar sind oder nicht. Sollte ein Netzelement automatisiert befahrbar sein, werden AV auf diesen auch im automatisierten Modus genutzt und nicht manuell gefahren.

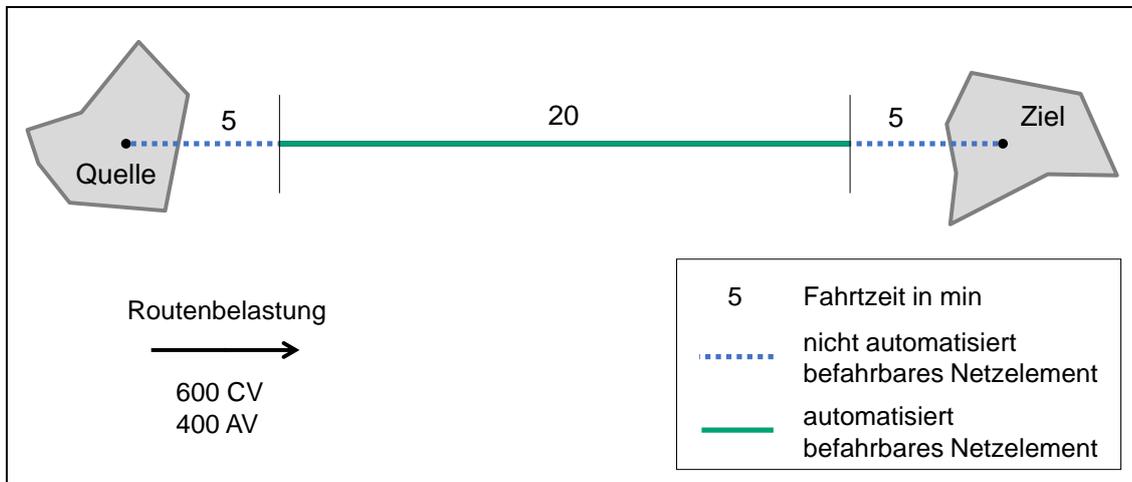


Abbildung 15: Vereinfachtes Netzmodell mit Fahrzeiten für eine Quelle-Ziel-Relation.

Auf der betrachteten Route im Beispiel beträgt die tatsächliche Fahrtzeit für CV und AV 30 min. AV sind in der Lage, für einen Fahrtabschnitt der Dauer von 20 min automatisiert zu fahren. In den ersten und letzten fünf Minuten muss eine Person die Fahraufgabe übernehmen.

Für die Parameter der Zeitwahrnehmung manueller und automatisierter Fahrtzeit gelten die Annahmen aus (45). Ein Parameterwert von 0,7 bedeutet, dass die wahrgenommene automatisierte Fahrtzeit 70 % der tatsächlichen automatisierten Fahrtzeit entspricht.

$$\begin{aligned} \beta_t^{n-autom} &= 1,0 \\ \beta_t^{autom} &= 0,7 \end{aligned} \tag{45}$$

Setzt man diese Werte und die Fahrzeiten aus Abbildung 15 in die Formeln (38) und (39) ein, erhält man mithilfe des AV-Anteils und der Gewichtung aus (40) die empfundene Fahrtzeit von 27,6 min für den Modus Pkw (siehe (46)). Diese geht als Teil der Kenngrößenmatrix der empfundenen Fahrtzeit des Modus Pkw über die Rückkopplung der Angebotsqualität in die Nachfrageberechnung ein (siehe Abbildung 12). Für den Fall mehrerer möglicher Routen für die Quelle-Ziel-Relation würde sich der angepasste Widerstand unmittelbar für das Verkehrssystem AV auf die Routenwahl auswirken.

$$\begin{aligned}
 t_{odr}^{CV,perc} &= 1,0 \cdot (5 + 20 + 5) = 30 \\
 t_{odr}^{AV,perc} &= 1,0 \cdot (5 + 20 + 5 - 20) + 0,7 \cdot 20 = 24 \\
 P_{AV} &= \frac{400}{600 + 400} = 0,4 \\
 t_{od}^{Car,perc} &= (1 - 0,4) \cdot 30 + 0,4 \cdot 24 = 27,6
 \end{aligned}
 \tag{46}$$

Bewertung

Die Umsetzung der vorgestellten Methode erfordert keine größeren Änderungen in einem bestehenden, kalibrierten Verkehrsnachfragemodell. Dennoch ermöglicht der Ansatz, die Nachfragewirkung der Zeitwahrnehmung in automatisierten Fahrzeugen abzuschätzen. Eine Veränderung der Fahrtzeitwahrnehmung, wie sie in der vorgestellten Methode implementiert ist, wirkt sich direkt auf die Ziel-, Modus- und Routenwahl aus. Die Effekte skalieren mit dem AV-Anteil und dem Parameter für die Fahrtzeitwahrnehmung in AV. Die Annahme dieses Parameterwerts (und ggfs. des Grenzwerts) hat einen großen Einfluss auf die Modellergebnisse und ist mit Unsicherheiten verbunden, da sich Erkenntnisse aus der Literatur auf angegebene Präferenzen und nicht auf tatsächliche Beobachtungen stützen.

Die Methode, so wie hier vorgestellt, nimmt an, dass der Parameter für die Zeitwahrnehmung in AV für alle Nachfragegruppen gleich ist. Diese Vereinfachung könnte mit Parametern, die von der Nachfragegruppe abhängen, aufgelöst werden. Statt die Kenngrößenmatrix der empfundenen Fahrtzeit global zu berechnen und für den Modus Pkw zu setzen, müssten die Kenngrößenmatrizen für nichtautomatisierte und automatisierte Fahrtzeit separat in sämtliche Nutzenfunktionen integriert werden. Dort kann dann eine nachfragegruppenspezifische Anpassung der Parameterwerte für die automatisierte Fahrtzeit vorgenommen werden.

Eine weitere Limitation betrifft den Anwendungsfall, dass AV nicht vollautomatisiert sind und damit lediglich als Verkehrssystem des Modus Pkw gelten. Für vollautomatisierte AV muss ein eigenständiger Modus eingerichtet werden. Das bringt Anforderungen an die Einteilung der Personengruppen mit sich. Es muss dann für jede Personengruppe unabhängig von einer bestehenden Fahrerlaubnis klar sein, ob ein AV zur Verfügung steht oder nicht. Der neue Modus Pkw-AV nutzt dann wie auch der Modus Pkw-CV nur die empfundenen Fahrtzeiten des jeweiligen zugehörigen Verkehrssystems. Eine Gewichtung anhand des AV-Anteils ist nicht mehr erforderlich.

4.4 Zwischenfazit

Die Modellierung automatisierter Fahrzeuge erfordert Anpassungen der Modellierungsmethoden. Das Kapitel gibt einen allgemeinen Überblick zu Modifikationen für das Integrieren automatisierter Fahrzeuge im Privatbesitz und als Teil vollautomatisierter Mobilitätsdienstleistungen in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle.

Für automatisierte Fahrzeuge, die sich im Privatbesitz befinden, sind neben dem Berücksichtigen dieser in der Moduswahl die Modellkomponenten Fahrzeitermittlung und Zeitwahrnehmung anzupassen, weil sich AV den Erkenntnissen vieler Studien zufolge darauf auswirken. Änderungen von tatsächlichen oder empfundenen Fahrzeiten sind entscheidend für den Modellablauf eines klassischen Vier-Stufen-Modells, weil diese die Angebotsqualität beeinflussen, die sich durch Rückkopplung in der Verkehrsnachfrageberechnung auf die Ziel-, Modus- und Routenwahl auswirkt.

Um Wirkungen einer veränderten Leistungsfähigkeit von AV in Fahrzeitermittlungsmodellen zu berücksichtigen, kann das Konzept der Pkw-Einheiten dafür erweitert werden, wie die erste Methode zeigt. Die Leistungsfähigkeit eines AV wird dann über Faktoren angegeben, die von der Funktionalität des Fahrzeugs und vom Typ der Straßenanlage abhängen können. Eine weitere Methode bildet Kapazität und Nachfrage in Fahrzeug- oder Zeiteinheiten ab und errechnet die Auslastung aufgrund der Zeitlücken zwischen Fahrzeugen und der Fahrzeuglängen. Fahrzeiten für den belasteten Zustand werden in beiden Methoden mit auslastungsabhängigen Modellen ermittelt.

Für das Berücksichtigen von Wirkungen auf die Zeitwahrnehmung in AV muss im Modell die manuelle und automatisierte Fahrzeit getrennt ermittelt werden. Die automatisierte Fahrzeit wird mit einem zusätzlichen Parameter multipliziert, der vom Modellanwender vorgegeben wird. Dies wirkt sich auf die Routenwahl aus. Anhand des AV-Anteils werden die empfundenen Fahrzeiten für die Verkehrssysteme CV und AV gewichtet gemittelt, um eine empfundene Fahrzeitenmatrix als Input für Ziel- und Moduswahl zu erhalten.

5 Aufbau der Szenarien und Modellanwendung

Das Ziel besteht darin, potenzielle Auswirkungen von AV auf Reisezeit, Ziel-, Modus- und Routenwahl durch Ertüchtigung und Anwendung eines makroskopischen Verkehrsnachfragemodells zu ermitteln. Dafür wird das Modell des Verbands Region Stuttgart verwendet, welches zunächst vorgestellt wird. Es folgt die Beschreibung von Annahmen, die den Rahmen für den späteren Aufbau der Szenarien setzen. Zur Unterscheidung, auf welchen Typen von Straßenanlagen AV mit welcher Funktionalität automatisiert fahren können, werden verschiedene Varianten von automatisiert befahrbaren Netzen definiert. Für ausgewählte Methoden zur Leistungsfähigkeit und Zeitwahrnehmung aus Kapitel 4 werden zugehörige Annahmen erläutert und Hinweise zur Umsetzung gegeben. Nach Anmerkungen zum gewählten Umlegungsverfahren wird eine Übersicht zu den untersuchten Szenarien gegeben, die gerechnet werden sollen. Die Szenarien werden durch Kombination der Ausprägungen für Annahmen gebildet.

5.1 Verkehrsnachfragemodell des Verbands Region Stuttgart

Das Verkehrsnachfragemodell des Verbands Region Stuttgart, welches in dieser Arbeit im Rahmen der Modellanwendung zum Einsatz kommt und als Bezugsfall bezeichnet wird, bildet einen durchschnittlichen Werktag im Jahr 2025 ab. Es handelt sich dabei um eine Fortschreibung des Modells für den Analysefall im Jahr 2010, das auf Grundlage einer Haushaltsbefragung erstellt und kalibriert wurde (PTV (2011)). Die Befragung umfasst 5.000 Haushalte, 13.000 Personen und 270.000 berichtete Wege innerhalb eines siebentägigen Wegetagebuchs. Die Fortschreibung beinhaltet alle zum Zeitpunkt der Modellerstellung bekannten und verkehrlich relevanten Maßnahmen und Entwicklungen, die bis 2025 eintreten oder umgesetzt werden. Analyse- und Bezugsfall wurden in der Verkehrsplanungssoftware VISUM erstellt.

Im Datenmodell Mobilitätsverhalten ist die Verkehrsnachfrage in 23 verhaltenshomogene Personengruppen und 19 Wegezwecke bzw. Aktivitäten unterteilt. Personengruppen unterscheiden meist Pkw-Verfügbarkeit, allgemeine Charakteristika zum Beruf und Alter. Für jede Personengruppe sind Aktivitätenketten mit Mobilitätsraten hinterlegt.

Im Planungsraum, der neben der Stadt Stuttgart die Landkreise Ludwigsburg, Rems-Murr-Kreis, Göppingen, Esslingen und Böblingen umfasst, werden Haupt- und Nebenstraßen, das Schienennetz und sämtliche ÖV-Linien mit Fahrplan abgebildet. Im erweiterten Modellraum außerhalb der Region Stuttgart sind das Hauptstraßennetz, das Schienennetz und überregionale ÖV-Linien mit Fahrplan enthalten. Planungsraum und erweiterter Modellraum sind in Abbildung 16 dargestellt.

Das Modell beinhaltet die Verkehrsmittel Pkw, Fuß, Rad, Bus, diverse Nahverkehrs- und Fernverkehrsbahnen und Lkw. Als Modi stehen Pkw-Fahrer, Pkw-Mitfahrer, ÖV-Einzelticket, ÖV-Monatsticket, Fuß, Rad, Park & Ride und Lkw zur Verfügung. Abgesehen von den zwei zusätzlichen Nachfragesegmenten ÖV-extern und Pkw-extern, die auf die Modi

ÖV-Einzelticket bzw. Pkw-Fahrer zugreifen, gibt es für jeden Modus ein zugehöriges Nachfragesegment.

Daten zu Einwohnern pro Personengruppe und Strukturgrößen für Aktivitäten sind auf Ebene von Verkehrszellen verfügbar. Der Planungsraum besteht aus 1.013 Verkehrszellen, wovon ungefähr die Hälfte auf die Stadt Stuttgart entfällt. Die Größe der Zellen nimmt von Baublöcken in der Innenstadt bis hin zu Gemeinden in der Region nach außen hin stets zu. Mit dem erweiterten Modellraum und räumlich nicht aufgelösten Kordon-Verkehrszellen beträgt die Anzahl an Verkehrszellen im Modell insgesamt 1.175.

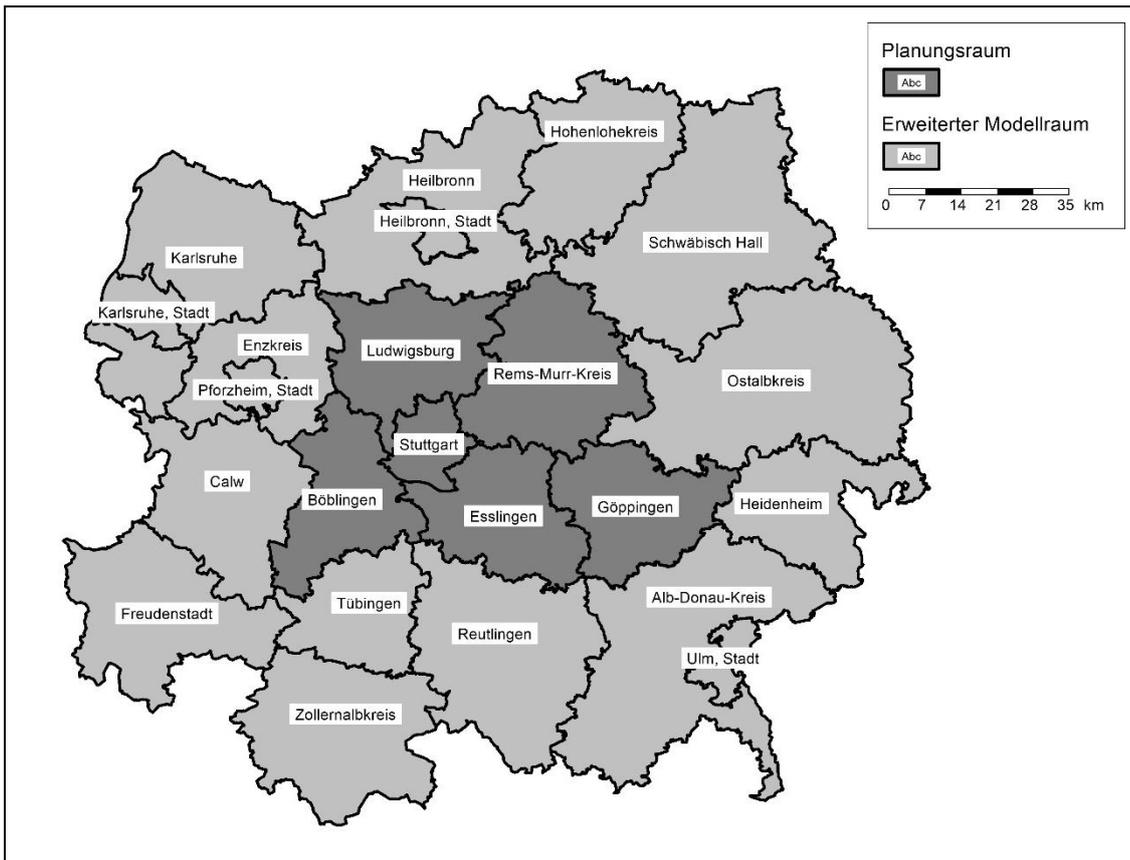


Abbildung 16: Land- und Stadtkreise des Planungsraums der Region Stuttgart und des erweiterten Modellraums um die Region.

Die Nachfrageberechnung nutzt den Ansatz VISEM, ein aktivitätenbasiertes Wegekettenmodell, das bereits in Kapitel 2.3.2 im Abschnitt Verkehrsnachfragemodellierung mit VISEM beschrieben wurde. VISEM bildet die Modellstufen Verkehrserzeugung und eine kombinierte Ziel- und Moduswahl ab, um die Ortsveränderungen des Personenverkehrs innerhalb der Region Stuttgart zu ermitteln. Ein Umlegungsverfahren, das als Routenwahlmodell ein statisches, deterministisches Nutzergleichgewicht annimmt, ergänzt den Modellablauf. Dieser enthält auch eine Rückkopplung der Angebotsqualität nach der Routenwahl zur Nachfrageberechnung. Die Umlegung berücksichtigt auch jene Verkehrsnachfrage, die nicht berechnet wird, sondern über konstante Matrizen vorgegeben

ist. Dazu gehören beispielsweise Wirtschafts- und Güterverkehr sowie Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehr der Region.

Modellergebnisse für den Bezugsfall sind in Kapitel 6.2 zu finden.

5.2 Grundlegende Annahmen

Automatisierte Fahrzeuge ersetzen konventionelle Fahrzeuge zu einem vorgegebenen Anteil in der Fahrzeugflotte privater Pkw für die im Nachfragemodell berechneten Ortsveränderungen. Die Marktdurchdringung erfolgt dabei homogen über die Personengruppen mit Pkw-Verfügbarkeit. Die externe Pkw- und die gesamte Lkw-Verkehrsnachfrage bleiben insgesamt unverändert und werden durch konventionelle Fahrzeuge bedient.

AV sind nicht vollautomatisiert, sodass deren Nutzung eine Fahrerlaubnis erfordert und keine Leerfahrten möglich sind. Damit bleibt die Pkw-Verfügbarkeit für Personengruppen unverändert zum Originalzustand des Bezugsfalls. Im Rahmen der Modellanwendung sind AV hochautomatisiert, fahren damit innerhalb ihrer ODD eigenständig und erfordern dafür keine Aufmerksamkeit oder Übernahmebereitschaft der chauffierten Person. Annahmen bezüglich der ODD werden in Kapitel 5.3 behandelt. Die Gestaltung der Szenarien ist teilweise an OLSTAM UND JOHANSSON (2019) angelehnt. Die englischen Begriffe, die dafür zentral sind, werden weitestgehend übernommen.

Das Ziel der Modellanwendung ist es, viele der möglichen zukünftigen Zustände mit AV und CV, die über einen langen Zeitraum verteilt auftreten könnten, abzudecken und zu untersuchen. Um diesen Zeitraum von 0 % bis 100 % AV greifbarer zu machen, wird er in drei Phasen der Koexistenz eingeteilt: Introductory (Einführung), Established (Etablierung) und Prevalent (Dominanz).

Diese Phasen stehen im Zusammenhang mit AV-Anteilen, die im Zeitverlauf ansteigen. Ebenfalls wird angenommen, dass die Entwicklung der automatisierten Fahrtechnik fortschreitet, sodass in den Phasen verschiedene AV-Klassen auftreten. Hierunter sind weder explizite Fahrzeugmodelle, noch Fahrzeugklassen im alltäglichen Sprachgebrauch, die sich bezüglich Fahrzeuggröße und -preis unterscheiden, gemeint. Die AV-Klassen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Fahrfunktionalität auf verschiedenen Straßenklassen, was sich in der Leistungsfähigkeit widerspiegelt. Dies wird durch die Anwendung unterschiedlicher PE-Faktoren für die jeweiligen AV-Klassen berücksichtigt. Die Phasen der Koexistenz definieren damit den Einfluss der Leistungsfähigkeit von AV auf die Fahrzeiten und Verkehrsnachfrage. Detailliertere Ausführungen zu den Annahmen hierzu sind in Kapitel 5.4 zu finden.

Für jede Phase und damit jede zugehörige AV-Klasse werden mehrere Anteile für die Durchdringung der privaten Fahrzeugflotte gesetzt, die sich auch teilweise zwischen den Phasen überschneiden. Die Vorgabe der verfügbaren AV erfolgt proportional für die gesamte berechnete Nachfrage im Planungsraum. Zusätzliche Kosten im Zusammenhang

mit AV werden vernachlässigt. Eine Übersicht zu den Phasen der Koexistenz und zugehörigen AV-Klassen und -Anteilen ist in Tabelle 2 enthalten.

Phase	Abkürzung	Kurzbeschreibung	AV-Klasse	AV-Anteile
Introductory (Einführung)	Intr	AV sind verfügbar, aber der Großteil der Fahrzeuge sind CV.	Basic	20 %, 40 %, 60 %
Established (Etablierung)	Esta	AV haben sich als Verkehrssystem etabliert. Es gibt immer noch einen relevanten Anteil an CV.	Intermediate	40 %, 60 %, 80 %
Prevalent (Dominanz)	Prev	AV dominieren, aber CV sind immer noch präsent.	Advanced	60 %, 80 %, 100 %

Tabelle 2: Phasen der Koexistenz und zugehörige AV-Klassen und -Anteile.

Es wird darauf verzichtet, in den Phasen verschiedene AV-Klassen zu kombinieren, da dies einen erhöhten Aufwand für die Modellierung an sich, die Anpassung der CR-Funktion und das Umlegungsverfahren inklusive erhöhter Rechenzeit mit sich bringen würde. Bei gleichmäßiger Verteilung der AV zweier unterschiedlicher AV-Klassen in der privaten Fahrzeugflotte könnte statt zwei AV-Klassen mit unterschiedlichen PE-Faktoren auch eine AV-Klasse genutzt werden, die durch einen gewichtet gemittelten PE-Faktor repräsentiert wird.

Neben der Leistungsfähigkeit von AV, die über die AV-Klassen berücksichtigt wird, ist die Wahrnehmung der automatisierten Fahrtzeit ein weiterer zentraler Einflussfaktor für die Modellanwendung. Die Zeitwahrnehmung in AV kann für alle Phasen zusätzlich abgebildet werden. Für eine isolierte Betrachtung des Einflusses aus der Zeitwahrnehmung wird eine weitere Gruppe für Szenarien mit der Bezeichnung Original eingeführt, die unabhängig von den Phasen der Koexistenz ist. Innerhalb dieser Szenariengruppe gibt es keine Einflüsse der Leistungsfähigkeit von AV und es werden AV-Anteile von 20-100 % in 20 %-Schritten vorgegeben. Die PE-Faktoren für AV entsprechen in diesen Szenarien damit den originalen PE-Faktoren von CV. Genaue Ausprägungen der Annahmen zur Zeitwahrnehmung werden in Kapitel 5.5 erläutert.

Wirkungen für beide Einflussfaktoren treten nur dann auf, wenn AV auch automatisiert fahren. Dazu werden Netzelemente nach der Möglichkeit des automatisierten Fahrtbetriebs klassifiziert, wie im folgenden Kapitel beschrieben.

5.3 Varianten von AV-ready Netzen

Um zu unterscheiden, auf welchen Netzelementen AV im automatisierten Modus fahren können, wurde im Rahmen des CoEXist-Projekts der Begriff AV-ready eingeführt. Ein AV-ready Netzelement erfüllt die Voraussetzungen, um als geeignet für automatisiertes Fahren zu gelten. Sobald sich AV auf diesen Netzelementen befinden, fahren diese automatisiert. Dies gilt unabhängig von den für ein AV angenommenen Eigenschaften bezüglich Leistungsfähigkeit oder Zeitwahrnehmung.

Für alle Netzelemente, die nicht AV-ready sind, gilt, dass eine Person die Fahraufgabe vollständig übernehmen muss. Im manuellen Fahrbetrieb entsprechen die Eigenschaften von AV denen von CV, sodass sich keine Änderungen bezüglich Leistungsfähigkeit oder Zeitwahrnehmung ergeben.

Die Eigenschaft AV-ready beinhaltet, dass alle Bedingungen der ODD für das automatisierte Fahren erfüllt sind. Alle Bedingungen, die eine ODD umfasst, die jedoch nicht über Informationen im Netzmodell bzw. Eigenschaften der Netzelemente abgedeckt sind, gelten stets als erfüllt. Das automatisierte Fahren, falls verfügbar, funktioniert stets fehlerfrei und es gibt keine Ausfälle automatisierter Fahrfunktionen. Ferner werden die Übergänge von automatisiertem zu manuellem Fahren und umgekehrt nicht explizit modelliert.

Für die Definition verschiedener Varianten von AV-ready Netzen werden angelehnt an OLSTAM UND JOHANSSON (2019) Straßenklassen definiert. Diese orientieren sich am Ausbauzustand, korrelieren aber größtenteils mit bestimmten Verbindungsfunktionsstufen (VFS), wie sie in den Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN) (FGSV (2008)) definiert sind. Die Einteilung wird daher um die Information zu den VFS in Tabelle 3 ergänzt, damit der Leser eine ganzheitlichere Vorstellung zu den Straßenklassen erhält. Die vierte Straßenklasse sowie alle Bezeichnungen weichen von OLSTAM UND JOHANSSON (2019) ab.

Straßenklasse	Straßenkategorie	Bezug zu VFS der RIN (FGSV (2008))
S1	Autobahnen oder autobahnähnliche Straßen	VFS 0 oder I
S2	Überregionalstraßen, zwischen- oder innergemeindliche Hauptverkehrsstraßen	VFS II
S3	regionale, zwischen- oder innergemeindliche Hauptverkehrsstraßen	VFS III oder IV
S4	Erschließungsstraßen	VFS IV oder V

Tabelle 3: Straßenklassen, zugehörige Straßenkategorien und Bezug zu VFS.

Die Attribuierung im Netz erfolgt für das Netzelement Strecken hauptsächlich aufgrund der Eigenschaft der Straßenkategorie und ergänzend unter Beachtung der Anzahl der Fahrstreifen, der zulässigen Geschwindigkeit, ob Fahrstreifen richtungsgetreunt sind und ob das Verkehrsmittel Rad freigegeben ist.

In Einzelfällen muss die Attribuierung manuell nachgearbeitet werden. Beispielsweise wird geprüft, ob es gerechtfertigt ist, dass Hin- und Rückrichtung einer Strecke verschiedenen Straßenklassen zugeordnet sind. Des Weiteren werden die Straßenklassen von Strecken, deren Klasse innerhalb einer Gruppe aufeinanderfolgender Strecken mehrfach wechselt, vereinheitlicht, da ein häufiger Wechsel zwischen manuellem Fahren und automatisiertem Betrieb unrealistisch erscheint. Bei der Vereinheitlichung wird die hierarchisch niedrigere Straßenklasse, d. h. die mit der größeren Nummer und korrelierender VFS, übernommen. Die Nachbearbeitung schließt mit einer optischen, stichprobenartigen Prüfung auf allgemeine Fehler der Klassifizierung.

Aufbauend auf den Straßenklassen für das Netzelement Strecken wird das Netzelement Abbieger klassifiziert. Ein Abbieger verbindet zwei Strecken. Die Strecke, aus deren Richtung der Abbieger beginnt, bestimmt dabei die Klasse für den Abbieger. Abbildung 17 zeigt das Ergebnis der Klassifizierung.

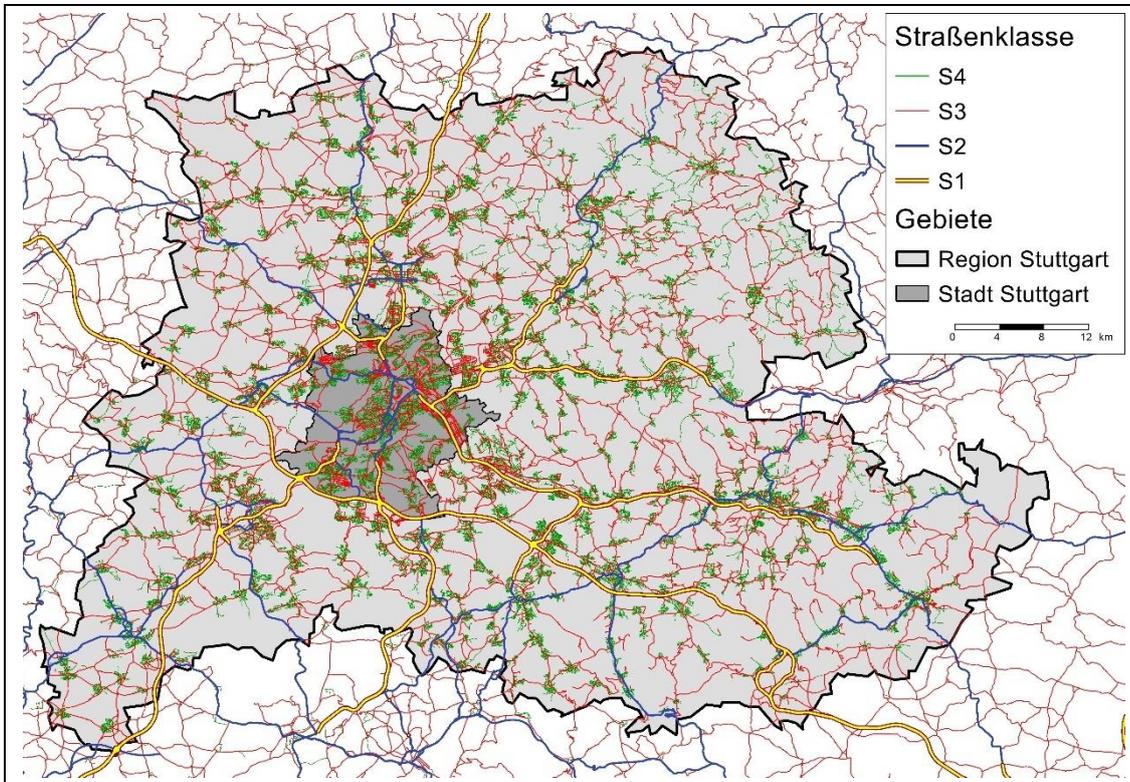


Abbildung 17: Straßenklassen in und um den Planungsraum Region Stuttgart.

Tabelle 4 zeigt die gerichtete Länge der Strecken für Netz, Region und Stadt pro Straßenklasse. Für die Region und Stadt Stuttgart steigen die Gesamtlängen von S1 bis S4 stets an. Im gesamten Netz hingegen gibt es kaum mehr S4-Strecken als in der Region, weil solche Strecken im erweiterten Modellraum nicht mehr modelliert sind. Für Region und Stadt stellt die Klasse S1 ca. 3 %, S2 3-4 % und S3 ein Drittel der Länge aller Strecken innerhalb des jeweiligen Gebietes. Im gesamten Netz beträgt der Anteil 7 % für S1, 11 % für S2 und gut die Hälfte für S3. Der Rest entfällt auf S4-Strecken.

Straßenklasse	Gesamtlänge in km (gerichtet)		
	gesamtes Netz	Region Stuttgart	Stadt Stuttgart
S1	3728 (7 %)	618 (3 %)	92 (3 %)
S2	5875 (11 %)	861 (3 %)	129 (4 %)
S3	28324 (53 %)	8389 (34 %)	1013 (33 %)
S4	15276 (29 %)	14684 (60 %)	1858 (60 %)

Tabelle 4: Gerichtete Länge und Anteile (in Klammern) der Netzelemente und pro Straßenklasse.

Die vier Straßenklassen bilden vier Varianten von AV-ready Netzen, die für die Modellanwendung zentral sind. Tabelle 5 zeigt die enthaltenen Straßenklassen und die jeweilige Länge für das gesamte Netz, Region und Stadt für die vier Netzvarianten. Die Netzvariante N1 enthält nur die Straßenklasse S1 und damit Autobahnen oder autobahnähnliche Straßen. Für die weiteren Netzvarianten kommt jeweils eine Straßenklasse hinzu und das AV-ready Netz wird dichter. Welches Netz in einem Szenario als AV-ready angenommen wird, kann durch die Funktionalität von AV, aber auch durch regulatorische Maßnahmen der Verkehrspolitik begründet sein.

Netz	enthaltene Straßenklassen	Gesamtlänge in km (gerichtet)		
		gesamtes Netz	Region Stuttgart	Stadt Stuttgart
N1	S1	3728	618	92
N2	S1 und S2	9603	1479	221
N3	S1, S2 und S3	37927	9868	1234
N4	S1, S2, S3 und S4	53203	24552	3092

Tabelle 5: Varianten der AV-ready Netze für die Modellanwendung.

5.4 Leistungsfähigkeit

Zunächst werden Annahmen erläutert, die spezifisch für die Leistungsfähigkeit von AV gelten. Die Bestimmung der konkreten Einflüsse von AV geschieht auf Grundlage von Daten aus mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen. Die dabei angesetzten Fahrverhaltenslogiken von AV basieren teilweise auf den Beobachtungen von Feldversuchen mit AV unter realen Verkehrsbedingungen. Ursprung und Form der Daten werden kurz vorgestellt. Die Auswertung der Daten führt zu konkreten Faktoren, wie sie in den Szenarien Anwendung finden. Das Kapitel schließt mit Hinweisen zur Umsetzung in der Verkehrsplanungssoftware VISUM.

5.4.1 Annahmen

Das Verkehrssystem AV erbt die Eigenschaften des Verkehrssystems CV im Netzmodell, sodass beide Verkehrssysteme auf denselben Netzelementen fahren können (unabhängig davon, ob automatisiert oder nicht) und dieselben Fahrtzeiten im unbelasteten Zustand aufweisen. Durch das auslastungsabhängige Fahrzeitermittlungsmodell werden auch beide Verkehrssysteme dieselben Fahrtzeiten im belasteten Zustand haben.

Anbindungen verbinden die Schwerpunkte von Verkehrszellen mit dem Netz und vertreten Zu- und Abgangswege, kurze Fahrtwege im untergeordneten (möglicherweise nicht modellierten) Netz, und Parksuchzeiten sowie -vorgänge. Ein vollständig eigenständiger Parkvorgang ohne sich im Fahrzeug befindliche Personen mit Abholen oder Abliefern von Personen an einem anderen Ort wird nicht angenommen. Für Zu- und Abgangswege

ergeben sich somit keine Änderungen durch Automatisierung. Die Modellanwendung geht ebenfalls nicht von einer hochgradigen Vernetzung mit der Infrastruktur aus, die Parksuchzeiten maßgeblich reduzieren kann. Der Komfort- oder Zeitgewinn durch Parkassistenten wird vernachlässigt. Anbindungen sind demnach nicht AV-ready.

Um darstellen zu können, dass AV zum einen über die Zeit hinweg leistungsfähiger werden, aber auch auf verschiedenen Straßenklassen nicht dieselben Fähigkeiten für den automatisierten Fahrbetrieb haben, werden im CoEXist-Projekt Fahrverhaltenslogiken definiert. Für die Arbeit von Relevanz sind drei Varianten für das Fahrverhalten, die übersetzt als Vorsichtig, Normal und Allwissend bezeichnet werden und im Folgenden nach OLSTAM UND JOHANSSON (2019) kurz beschrieben werden.

- **Vorsichtig:**
Die vorsichtige Fahrverhaltenslogik hält stets einen Abstand zum Vorderfahrzeug, der ein rechtzeitiges Anhalten ermöglicht, selbst wenn dieses unmittelbar an der aktuellen Position ohne Bremsweg stehen bleiben würde (BWS für brick-wall-stop). Das Fahrzeug verzögert jedes Mal, wenn die Erkennung durch Sensoren für ein rechtzeitiges Anhalten nicht ausreicht. Fahrstreifenwechsel werden nur durchgeführt, wenn dieser Abstand weiterhin eingehalten werden kann. Das Fahrzeug verhält sich stets sicher. Die Fahrverhaltenslogik erfordert keine Fahrzeugkommunikation oder -kooperation.
- **Normal:**
Die normale Fahrverhaltenslogik bildet das Fahrverhalten einer durchschnittlichen fahrenden Person ab, weist jedoch eine verbesserte Wahrnehmung der Umgebung durch Sensoren auf. Damit sind Entfernungen und Geschwindigkeiten benachbarter Fahrzeuge messbar. Dieses Fahrverhalten kann Fahrzeugkommunikation erfordern.
- **Allwissend:**
Hierfür liegt eine perfekte Wahrnehmung der Umgebung und Vorhersage des Verhaltens der anderen Verkehrsteilnehmenden zugrunde. Diese Fahrverhaltenslogik hält geringe Abstände bei allen Manövern und ist in der Lage, sich gegen andere Verkehrsteilnehmende durchzusetzen ohne jemals Unfälle zu verursachen. Es wird eine Art kooperatives Verhalten erwartet. Diese Art von Fahrlogik erfordert Fahrzeugkommunikation.

Das Ziel ist es, die Leistungsfähigkeit für jede dieser Fahrverhaltenslogiken zu identifizieren, sodass sinnvolle Annahmen für die Modellanwendung getroffen werden können. Die folgenden beiden Abschnitte beschreiben diesen Prozess.

5.4.2 Datengrundlage

Für einen Feldversuch auf einer Teststrecke bei Helmond in den Niederlanden stellt TASS International, ein Mitglied des CoEXist-Projektkonsortiums, welches in der Automobilbranche Testverfahren und Zertifizierungen aller Art im Bereich der Sicherheit anbietet, AV-Prototypen zur Verfügung. Es handelt sich dabei um drei umgebaute Toyota

Prius, die mit verschiedenen Einstellungen hintereinander die Teststrecke mehrfach abfahren. Die Teststrecke enthält Abschnitte mit verschiedenen Geschwindigkeitslimits von 50 km/h, 70 km/h, 80 km/h und 100 km/h sowie mehrere signalisierte Knotenpunkte. Die Experimente werden unter realen Verkehrsbedingungen unter Anwesenheit anderer am Verkehr teilnehmenden Personen und Fahrzeuge von TASS International durchgeführt. Dabei wird eine Vielzahl von Daten zum Fahrzeugzustand (Position, Geschwindigkeit), zur Fahrzeugsteuerung (Beschleunigungs- oder Verzögerungsrate) und zum Umfeld (Abstände, Anzahl und Art erkannter Objekte) protokolliert.

Eine weitere Quelle zu Fahrverhaltensdaten von AV stellen Ergebnisse von mikroskopischen Co-Simulationen dar. Dabei wird ein Fahrzeug mit einer automatisierten Fahrverhaltenslogik über eine Schnittstelle in VISSIM, der Software für mikroskopische Verkehrsflusssimulationen der PTV Group, simuliert. Die Fahrverhaltenslogik wurde von VEDECOM, einem weiteren Mitglied des CoEXist-Projektconsortiums, entwickelt. Detaillierte Beschreibungen zu den Experimenten und Co-Simulationen sowie zur Datenauswertung sind in SUKENNIK ET AL. (2018) zu finden.

Die gesammelten Daten aus Feldversuch und Co-Simulationen werden von der PTV Group, die ebenfalls zum CoEXist-Projektconsortium gehören, genutzt, um Fahrverhaltensmodelle in VISSIM für die drei Fahrverhaltenslogiken Vorsichtig, Normal und Allwissend abzuleiten. Die Analyse zeigt, dass zum damaligen Zeitpunkt VISSIM noch nicht ausreichend Funktionalität bietet, Fahrverhalten von AV adäquat abzubilden. SUKENNIK (2018) stellt dafür Softwareerweiterungen von VISSIM vor. Die wichtigsten Neuerungen bzw. Anpassungen der Software sind unterhalb aufgelistet.

- Das Setzen des Abstands, der rechtzeitiges Anhalten garantiert, selbst wenn das Vorderfahrzeug sofort auf der aktuellen Position stehen bleibt, ist möglich.
- Implizite stochastische Einflüsse z. B. beim Folgevorgang können deaktiviert werden, weil die menschliche Ungenauigkeit in Wahrnehmung, Einschätzung und Anpassung der Fahrzeugsteuerung auf AV nicht zutrifft, da diese deterministischer fahren.
- Die einzuhaltende Folgezeitlücke ist abhängig vom Verkehrssystem des Vorderfahrzeugs einstellbar.
- Die maximale Beschleunigungsrate kann auf über 100 % gesetzt werden, um im Fall einer starken Beschleunigung des Vorderfahrzeugs die Lücke nicht deutlich größer werden zu lassen.
- Die Anzahl erkennbarer Fahrzeuge und Objekte (z. B. Signalgeber) ist separat einstellbar, um Weitsicht durch Fahrzeugkommunikation nachzubilden.

SUKENNIK ET AL. (2019) stellen Hinweise und Hilfestellungen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation automatisierter Fahrzeuge zur Verfügung.

Für alle AV-Fahrverhaltensmodelle gilt:

- Das Wiedemann-99-Fahrzeugfolgemedell wird genutzt, weil es weniger Vereinfachungen als das Wiedemann-74-Fahrzeugfolgemedell umfasst.
- Es gibt keine impliziten, stochastischen Einflüsse auf das Fahrverhalten.

- AV halten sich stets an Geschwindigkeitslimits und es gibt daher nur eine sehr geringe Varianz in der Wunschgeschwindigkeitsverteilung von +/-2 km/h.
- AV können durch veränderte Wahrnehmungsschwellen im Fahrzeugfolgevorgang schneller reagieren.

Eine Auswahl der Annahmen für die Modelle, die die Fahrverhaltenslogiken spezifisch nachbilden sollen, wird im Folgenden aufgelistet. Erhöhungen oder Reduzierungen beziehen sich dabei immer auf die Standardwerte, die für die Modellierung konventioneller Fahrzeuge in VISSIM empfohlen werden.

- Fahrverhaltenslogik Vorsichtig:
 - hält mindestens den BWS-Abstand, ansonsten eine Nettozeitlücke von 1,5 s ein,
 - reduzierte maximale Beschleunigungs- und Verzögerungswerte,
 - keine Erhöhung der Wunschbeschleunigung.
- Fahrverhaltenslogik Normal:
 - hält mindestens eine Nettozeitlücke von 0,9 s zum Vorderfahrzeug ein,
 - maximale Beschleunigungs- und Verzögerungswerte nach Standard für CV,
 - Erhöhung der Wunschbeschleunigung um 5 %.
- Fahrverhaltenslogik Allwissend:
 - hält mindestens eine Nettozeitlücke von 0,7 s zum Vorderfahrzeug ein,
 - erhöhte maximale Beschleunigungs- und Verzögerungswerte,
 - Erhöhung der Wunschbeschleunigung um 10 %,
 - geringerer Stillstandsabstand,
 - kooperatives Fahrverhalten für Fahrstreifenwechsellvorgänge und Fahrzeugfolgevorgang (Anzahl erkennbarer Fahrzeuge größer eins, sofern in Reichweite).

Die ausführlichen Annahmen und Empfehlungen für die Fahrverhaltensmodelle sind in SUKENNIK UND KAUTZSCH (2019) verfügbar.

Mit diesen Fahrverhaltensmodellen führt die PTV Group umfangreiche mikroskopische Verkehrsflusssimulationen auf verschiedenen standardisierten Netzabschnitten durch. Das Fahrverhalten für konventionelle Fahrzeuge wurde für diese Netzabschnitte auf die Übereinstimmung mit den Kapazitätswerten aus dem HBS (FGSV (2015)) kalibriert. Die Netzabschnitte umfassen die folgenden Komponenten:

- dreistreifiger Autobahnabschnitt mit Aus- und Auffahrt (siehe Abbildung 18),
- zweistreifiger Autobahnabschnitt mit Aus- und Auffahrt,
- Autobahnabschnitt mit Fahrstreifenreduzierung von drei auf zwei Fahrstreifen,
- Autobahnabschnitt mit Fahrstreifenreduzierung von zwei auf einen Fahrstreifen,
- Streckenabschnitte mit Signalgeber, verschiedenen Freigabezeiten und teilweise Beschränkungen der Geschwindigkeit nach dem Signal, um eine Kurvigkeit zu repräsentieren,
- einfacher Streckenabschnitt mit verschiedenen Geschwindigkeitslimits,

- Vorfahrtsgeregelte Kreuzung von zwei einstreifigen Strecken,
- Vorfahrtsgeregelte Auffahrt von einer einstreifigen Strecke auf eine andere,
- einfacher Streckenabschnitt mit verschiedenen Steigungen.

In den Simulationen werden neben den AV-Fahrverhaltensmodellen und Netzabschnitten der AV-Anteil in 10 %-Schritten zwischen 0 % und 100 % und der Fahrzeugzufluss variiert. Es wird (abgesehen vom kalibrierten CV-Fahrverhaltensmodell) immer nur ein AV-Fahrverhaltensmodell und keine Kombinationen simuliert. Die verschiedenen Niveaus des Fahrzeugzuflusses sind so gewählt, dass unausgelastete, ausgelastete und überlastete Zustände in jedem Netz auftreten sollten. Der Fahrzeugzufluss besteht für alle Simulationen aus 100 % Pkw. Für jedes Netz werden Daten zur Fahrzeuganzahl und mittleren Geschwindigkeiten an mehreren Punkten gesammelt und über Skripte zu 5-min-Intervallen aggregiert. Alle Simulationen dauern 30 min und die ersten 5 min werden nicht ausgewertet, weil sich in diesem Zeitraum die Simulation dann noch nicht in einem eingeschwungenen Zustand befindet. Für jeden Satz an Eingangsgrößen werden zehn Simulationen mit unterschiedlichen Startzufallszahlen gerechnet. Detaillierte Annahmen zu den variierten Größen, Netzen und eine Auswahl der Ergebnisse zu den Simulationen sind in LOHMILLER ET AL. (2020) enthalten.

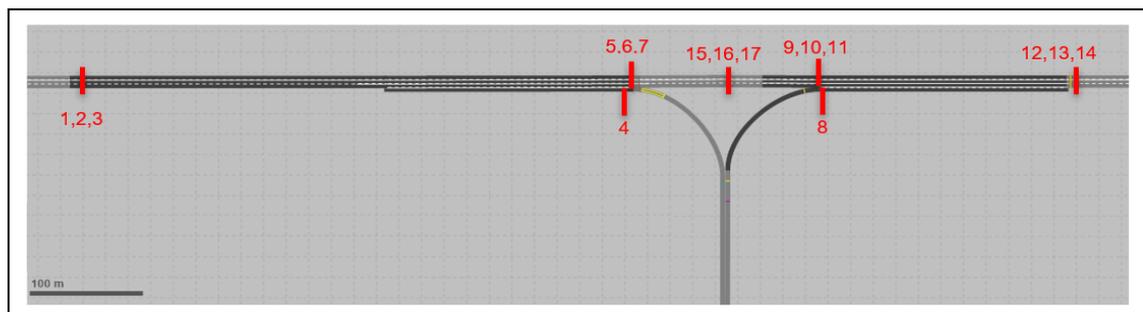


Abbildung 18: Dreistreifiges Autobahnabschnittsnetz mit Aus- und Auffahrt und Messquerschnitten aus LOHMILLER ET AL. (2020).

Die Daten zu Verkehrsstärken und mittleren Geschwindigkeiten werden von der PTV Group dazu verwendet, um mit dem in Kapitel 2.1.4 beschriebenen van-Aerde-Modell Fundamentaldiagramme zu erstellen und somit Kapazitäten zu bestimmen. Die Schätzung der Parameter für das van-Aerde-Modell gelingt jedoch nicht immer, weil die Daten eine unzureichende Anzahl an Wertepaaren im Bereich des gestauten Verkehrs enthalten. Zudem kommt es vor, dass eine Schätzung zwar gelingt, aber der Kapazitätswert als Scheitelpunkt der q-v-Kurve nicht realistisch oder aussagekräftig ist, weil es zu wenig Wertepaare in diesem Bereich gibt und die Schätzung auf zwei konzentrierten Punktwolken beruht. Beispiele für geschätzte Fundamentaldiagramme des dreistreifigen Autobahnabschnittes mit Aus- und Auffahrt sind in Abbildung 19 dargestellt.

Abgesehen von den unvollständigen Kapazitätswerten nach dem van-Aerde-Modell werden auch Verkehrsstärken des 95. Perzentils (q_{95}) als Alternative ausgewiesen. BRILON UND GEISTEFELDT (2010) gehen ähnlich vor und empfehlen, dass der geschätzte Kapazitätswert mit der Verkehrsstärke des 99. Perzentils (q_{99}) abgeglichen werden soll: Falls

der van-Aerde-Modellwert darüber liegt, sollte q_{99} verwendet werden, andernfalls der Modellwert. Wenn der Modellwert nicht ermittelbar und q_{95} größer als die Kapazität nach dem HBS (FGSV (2015)) ist, dann sollte q_{95} verwendet werden. Das HBS (FGSV (2015)) ist jedoch nicht für AV anwendbar. Als einheitliche Datenquelle für das weitere Vorgehen werden die Werte q_{95} als Kapazität verwendet.

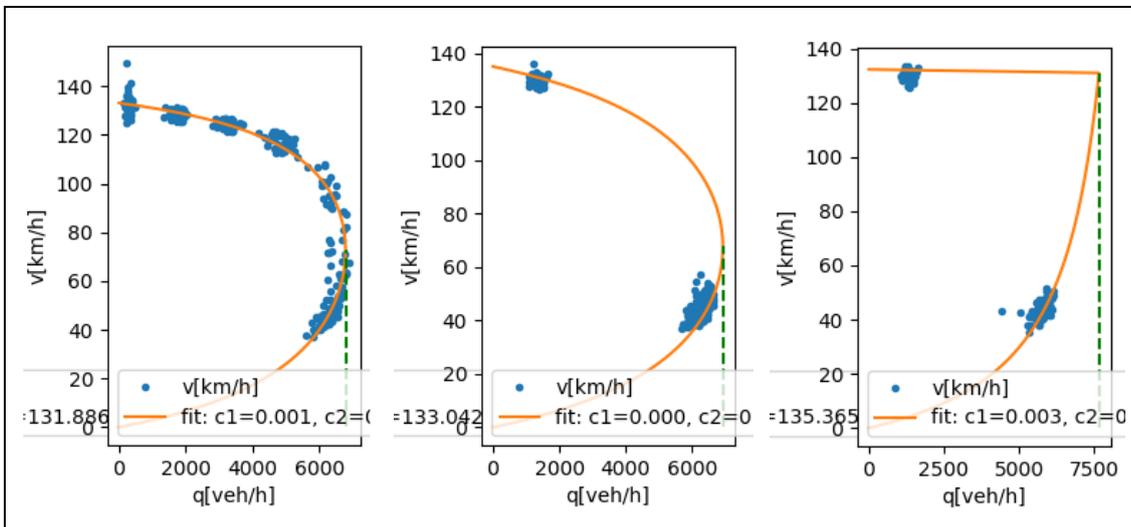


Abbildung 19: Beispiele für geschätzte q - v -Fundamentaldiagramme aus LOHMILLER ET AL. (2020), die als aussagekräftig (links), evtl. aussagekräftig (mittig) und nicht aussagekräftig (rechts) eingeordnet werden.

Für jedes Netz und jeden gemessenen Querschnitt liegen q_{95} -Werte für jedes AV-Fahrverhaltensmodell und jeden AV-Anteil vor. Abbildung 20 zeigt den Verlauf der q_{95} -Werte für den Messquerschnitt 1,2,3 (siehe Abbildung 18) im Netz des dreistreifigen Autobahnabschnitts. AV1 repräsentiert dabei das Fahrverhaltensmodell Vorsichtig.

Bis zu einem AV-Anteil von 30 % kommt es nur zu geringfügigen Änderungen der Kapazität, darüber sinkt diese ungefähr linear. Für die beiden Verläufe von AV2 (Normal) und AV3 (Allwissend) ergeben sich von 0 % bis 100 % AV ebenfalls annähernd lineare Steigerungen der Kapazität. Bis 50 % sind beide Kurven beinahe deckungsgleich, für höhere AV-Anteile zeigt sich dann, dass die Kapazität mit AV3 im Vergleich stärker ansteigt.

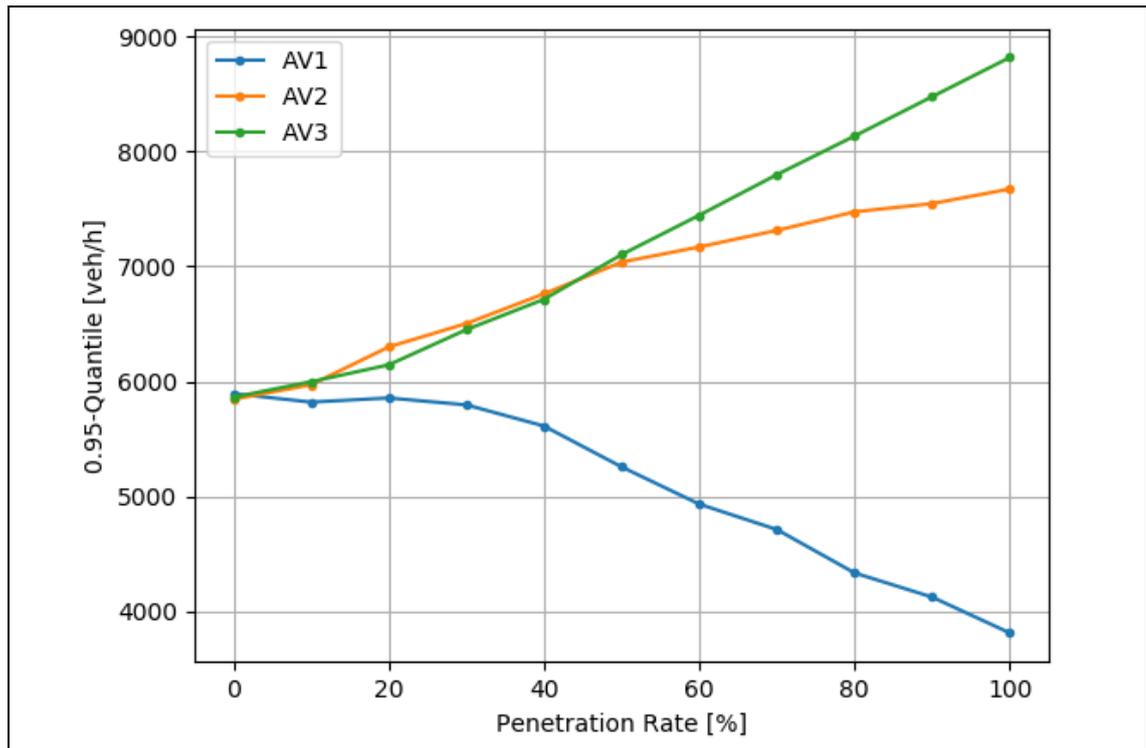


Abbildung 20: Kapazitätswerte (q_{95}) in Abhängigkeit des AV-Anteils für drei AV-Fahrverhaltensmodelle aus LOHMILLER ET AL. (2020).

5.4.3 Pkw-Einheiten-Faktoren

Die Kapazitätswerte aus den mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen bilden die Datengrundlage, um die Modellierungsmethode aus Abschnitt 4.2.1 Kapazität und Nachfrage in Pkw-Einheiten anwenden zu können. Das Ziel ist es, PE-Faktoren für jede AV-Fahrverhaltenslogik zu ermitteln.

Die Analyse der beobachteten Kapazitäten zeigt für den Großteil der Netze und Messquerschnitte, dass sich der Werteverlauf annähernd linear zum AV-Anteil verhält. Konstante PE-Faktoren können das besser reproduzieren als vom AV-Anteil zusätzlich abhängige PE-Faktoren, wie Formel (23) vorschlägt. Daher erfolgt die Bestimmung der PE-Faktoren mithilfe von Formel (22). Mit der Annahme einer Auslastung von 100 % mit $x_s = 1$, dem PE-Faktor für CV von $f_{s,CV}^{PE} = 1$, einer neuen Bezeichnung für die Kapazität für 0 % AV und der Repräsentation eines Messquerschnitts durch den Index s , ergibt sich Formel (47) wie folgt:

$$1 = \frac{q_{s,CV} + q_{s,AV} \cdot f_{s,AV}^{PE}}{q_{s,0\%}^{\max}} \quad (47)$$

mit

$q_{s,0\%}^{\max}$

Kapazität für 0 % AV für Messquerschnitt s in PE pro Stunde

Diese Kapazität wird für alle Berechnungen der PE-Faktoren als konstant angenommen. Mit dem AV-Anteil und zugehörigen, beobachteten Kapazitäten, können mit den Gleichungen aus (48) die Verkehrsstärken für CV und AV in Fahrzeugen pro Stunde ermittelt werden.

$$\begin{aligned} q_{s,CV} &= (1 - p_{s,AV}) \cdot q_{s,p\%}^{\max} \\ q_{s,AV} &= p_{s,AV} \cdot q_{s,p\%}^{\max} \end{aligned} \quad (48)$$

mit

$q_{s,p\%}^{\max}$ Kapazität für $p\%$ AV für Querschnitt s in Fahrzeugen pro Stunde

Das Umstellen der Formel (47) nach dem PE-Faktor für AV ergibt Formel (49). Das Einsetzen obiger Berechnungsvorschrift für die Verkehrsstärken führt zu Formel (50), mit der für jeden Messquerschnitt und jeden AV-Anteil ein PE-Faktor für AV ermittelt werden kann.

$$f_{s,AV}^{PE} = \frac{q_{s,0\%}^{\max} - q_{s,CV}}{q_{s,AV}} \quad (49)$$

$$f_{s,AV}^{PE,p\%} = \frac{q_{s,0\%}^{\max} - (1 - p_{s,AV}) \cdot q_{s,p\%}^{\max}}{p_{s,AV} \cdot q_{s,p\%}^{\max}} \quad (50)$$

mit

$f_{s,AV}^{PE,p\%}$ PE-Faktor für AV bei $p\%$ AV für Messquerschnitt s

Die PE-Faktoren für alle AV-Anteile und alle Messquerschnitte werden gemittelt, sodass sich für jede Fahrverhaltenslogik und jedes Netz ein Wert ergibt, der die Leistungsfähigkeit für AV in Form von Pkw-Einheiten repräsentiert. Die Netze werden dann Straßenklassen zugeordnet. Dabei werden die Netze der Autobahnabschnitte sowie der einfache Streckenabschnitt mit außerörtlicher Geschwindigkeitsbegrenzung der Straßenklasse S1 zugeordnet. Die anderen Netze, die Signalgeber, Vorfahrtsregelung oder einfache Streckenabschnitte mit innerörtlichen Geschwindigkeitsbeschränkungen enthalten, werden der Straßenklasse S3 zugerechnet. Der PE-Faktor für eine Straßenklasse ist das Mittel aus den PE-Faktoren für die Netze. Die Faktoren für die Straßenklasse S2 entsprechen dem Durchschnitt aus den Werten für S1 und S3. Für Erschließungsstraßen und damit Straßenklasse S4 wird nur von manuellem Fahren und damit einem PE-Faktor von eins ausgegangen.

Die resultierenden PE-Faktoren sind in Tabelle 6 zu sehen. Die Werte sind mit Ausnahme von S4 jeweils für die Straßenklasse S1 am geringsten und für S3 am höchsten. Die Fahrverhaltenslogiken Normal und Allwissend weisen Faktoren kleiner eins, und damit eine Steigerung der Leistungsfähigkeit von AV, aus. Je nach Straßenklasse und Fahrverhalten repräsentieren AV zwischen 15 % und knapp 30 % weniger Pkw-

Einheiten als herkömmliche Pkw. Für Vorsichtig ergeben sich um ca. 20-30 % höhere PE-Faktoren im Vergleich zur manuellen Fahrweise bzw. CV.

Straßenklasse	Vorsichtig	Normal	Allwissend
S1	1,20	0,77	0,73
S2	1,26	0,81	0,76
S3	1,32	0,85	0,79
S4	(n. a.) 1,00	(n. a.) 1,00	(n. a.) 1,00

Tabelle 6: PE-Faktoren der Fahrverhaltenslogiken für die Straßenklassen (n. a. für nicht automatisiert).

In Anlehnung an OLSTAM UND JOHANSSON (2019) werden die Fahrverhaltenslogiken den AV-Fahrzeugklassen, die in Tabelle 2 eingeführt werden, für jede Straßenklasse zugeordnet. Tabelle 7 zeigt diese Zuordnung, die auf den erwarteten Fahrfähigkeiten der AV-Klassen basiert. Auf S4-Straßen wird automatisiertes Fahren nicht unterstützt. Basic AV können auf S3 ebenfalls nicht automatisiert fahren.

Straßenklasse	Basic AV	Intermediate AV	Advanced AV
S1	Vorsichtig	Normal	Allwissend
S2	Vorsichtig	Normal	Allwissend
S3	nicht automatisiert	Vorsichtig	Normal
S4	nicht automatisiert	nicht automatisiert	nicht automatisiert

Tabelle 7: Zuordnung der Fahrverhaltenslogiken zu den AV-Klassen.

Mit der Übertragung der zu den Fahrverhaltenslogiken zugehörigen PE-Faktoren ergibt sich der Zusammenhang zwischen Straßenklasse, AV-Klasse und PE-Faktor aus Tabelle 8. Diese Werte werden nur berücksichtigt, wenn die Straßenklasse einer bestimmten Straße AV-ready ist.

Straßenklasse	Basic AV	Intermediate AV	Advanced AV
S1	1,20	0,77	0,73
S2	1,26	0,81	0,76
S3	(n. a.) 1,00	1,32	0,85
S4	(n. a.) 1,00	(n. a.) 1,00	(n. a.) 1,00

Tabelle 8: PE-Faktoren für AV-Klassen pro Straßenklasse (n. a. für nicht automatisiert).

Es ist zu betonen, dass diese PE-Faktoren nicht als exakte Werte pauschal für den Einfluss von AV betrachtet werden sollten. Sie repräsentieren lediglich in aggregierter Form das Fahrverhalten der Fahrverhaltenslogiken und dienen als Annahme für die in dieser Arbeit vorgestellten Szenarien.

Das in diesem und vorigem Kapitel beschriebene Vorgehen wird in Abbildung 21 zusammengefasst. Die Abbildung zeigt die Arbeitsschritte von Feldversuch und

mikroskopischen Co-Simulationen über Fahrverhaltensmodelle für die AV-Fahrverhaltenslogiken zu den endgültigen PE-Faktoren, die im auslastungsabhängigen Modell für die Umlegung zum Einsatz kommen.

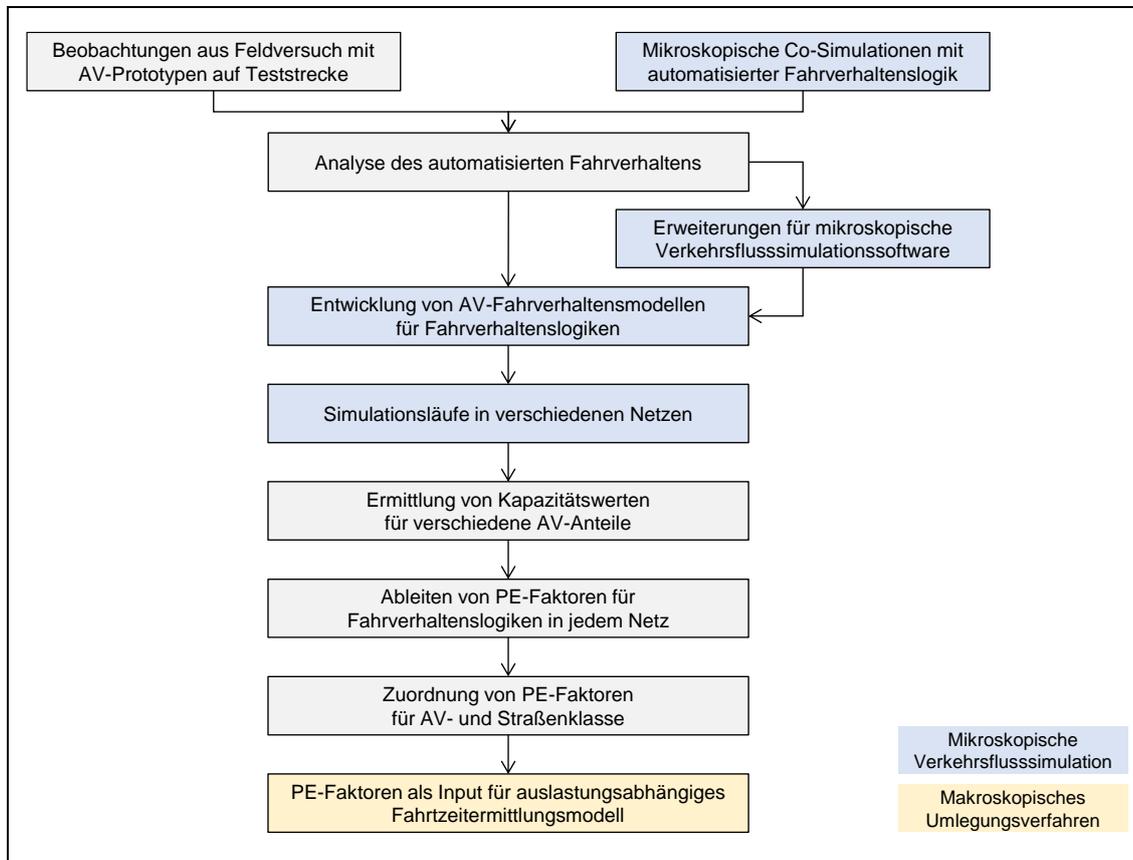


Abbildung 21: Arbeitsschritte für die Bestimmung der PE-Faktoren für AV.

5.4.4 Umsetzung

Der Einfluss von AV auf den Verkehrsablauf wird im auslastungsabhängigen Fahrzeitermittlungsmodell ohne jegliche Änderungen bezüglich der Kapazitäten umgesetzt.

Die CR-Funktion, die im Verkehrsnachfragemodell des VRS verwendet wird, muss so erweitert werden, dass die PE-Faktoren für AV von der Straßenklasse und der AV-ready-Eigenschaft der Netzelemente abhängen. Da dies standardmäßig von VISUM nicht unterstützt wird, muss eine benutzerdefinierte CR-Funktion in C++ programmiert werden. Dafür gibt es in PTV (2020) allgemeine Vorlagen und Hinweise. Hilfestellung zur Abhängigkeit des PE-Faktors von Netzelementen ist in SONNLEITNER UND FRIEDRICH (2020b) zu finden.

Die CR-Funktion wird über eine DLL-Datei eingebunden und ersetzt somit die originale CR-Funktion. Zugehörige Parameter und der Funktionstyp an sich (BPR, Lohse, etc.) werden unverändert übernommen. Die CR-Funktion greift auf die folgenden Attribute zu:

- Kapazität,

- Fahrtzeit im unbelasteten Zustand,
- globale und konstante PE-Faktoren für alle nichtautomatisierten Verkehrssysteme,
- PE-Faktor für AV auf Netzelement (benutzerdefiniert),
- AV-ready-Eigenschaft eines Netzelements (benutzerdefiniert).

Die benutzerdefinierten Attribute müssen erstellt und den Annahmen entsprechend mit Werten belegt werden. Während der Umlegung werden dann mit den Verkehrsstärken für jedes Verkehrssystem die Fahrtzeiten im belasteten Zustand ermittelt. Detaillierte Hinweise zum Vorgehen für verschiedene Softwareversionen von VISUM sind in SONNLEITNER UND FRIEDRICH (2020b) und zugehöriger Programmcode in SONNLEITNER UND FRIEDRICH (2020a) verfügbar.

Es ist zu beachten, dass es sich bei einer Umlegung mit AV und CV mit den vorgestellten Annahmen um eine Simultanumlegung mit asymmetrischem Einfluss zwischen den Verkehrssystemen handelt. Daher gilt, dass für alle auftretenden Belastungen verschiedener Verkehrssysteme die CR-Funktion für die Existenz einer Lösung kontinuierlich und für die Eindeutigkeit einer Lösung (notwendig, aber nicht hinreichend) streng monoton steigend sein muss (siehe Abschnitt 2.3.3 Simultanumlegung).

5.5 Zeitwahrnehmung

Das Kapitel beschreibt die Annahmen, mit denen Einflüsse der Zeitwahrnehmung in AV auf die Verkehrsnachfrageberechnung in der Modellanwendung abgebildet werden sollen. Die Umsetzung geht auf das allgemeine Vorgehen und softwareseitige Limitationen ein.

5.5.1 Annahmen

Die Grundannahme für die Variation der Wahrnehmung der automatisierten Fahrtzeit ist, dass diese entweder unverändert zur Wahrnehmung manueller Fahrtzeit bleibt oder so angepasst wird, dass sie als kürzer wahrgenommen wird. Dies führt zu den drei in Tabelle 9 gezeigten Einstellungen für die Szenarien. Die wahrgenommene manuelle Fahrtzeit entspricht stets der tatsächlichen manuellen Fahrtzeit ($\beta_t^{n-autom} = 1$).

Die Reduktionen der tatsächlichen automatisierten Fahrtzeit durch die Ausprägungen des multiplikativen Parameters für red-15 und red-30 liegen im Bereich der Ergebnisse vieler in der Literaturübersicht vorgestellter Studien aus Abschnitt 3.3.3. Die Verwendung des Grenzwerts für die Szenarien ist damit begründet, dass für sehr kurze automatisierte Fahrabschnitte keine relevanten, empfundenen Zeitvorteile erwartet werden. Darüber hinaus erfolgt keine Unterscheidung der Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit für Wegezwecke oder Personengruppen.

Name	Beschreibung	Parameter für Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit	
		Wahrnehmungsparameter	Grenzwert in min
normal	Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit entspricht der Wahrnehmung manueller Fahrtzeit	$\beta_t^{autom} = 1,00$	keine Anwendung des Grenzwerts
red-15	Die automatisierte Fahrtzeit, die 10 min übersteigt, wird als 15 % kürzer wahrgenommen	$\beta_t^{autom} = 0,85$	$t^l = 10$
red-30	Die automatisierte Fahrtzeit, die 10 min übersteigt, wird als 30 % kürzer wahrgenommen	$\beta_t^{autom} = 0,70$	$t^l = 10$

Tabelle 9: Name, Beschreibung und gewählte Parameter für die Einstellungen, die für die Wahrnehmung der automatisierten Fahrtzeit gelten sollen.

In den Fällen red-15 und red-30 wird für die ersten zehn Minuten der automatisierten Fahrtzeit keine veränderte Zeitwahrnehmung angenommen. Die Berücksichtigung eines solchen Grenzwerts hat zur Folge, dass sich für die Annahmen und Umsetzung zwischen Ziel- und Moduswahl auf der einen, und Routenwahl auf der anderen Seite Unterschiede ergeben. Diese werden im Folgenden genauer erläutert.

Ziel- und Moduswahl

Die veränderte Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit wirkt über die Kenngrößenmatrix der empfundenen Fahrtzeit für den Modus Pkw-Fahrer, die in den Nutzenfunktionen für Ziel- und Moduswahl hinterlegt werden muss. Durch die Betrachtung der Fahrtzeit auf Ebene der Relationen können die obigen Annahmen unverändert übernommen und angewendet werden.

Routenwahl

Der Einfluss einer veränderten Zeitwahrnehmung für automatisierte Fahrtzeiten soll auch in der Routenwahl berücksichtigt werden. Hierbei gibt es im Vergleich zur Ziel- und Moduswahl zwei entscheidende Unterschiede. Der Einfluss muss direkt während der Umlegung und nicht erst danach über Kenngrößenmatrizen bzw. über alle Routen gemittelte Fahrtzeiten abgebildet werden können. Außerdem soll die veränderte Zeitwahrnehmung nur die nutzenden Personen des Verkehrssystems AV betreffen, da sich für die des Verkehrssystems CV keine Änderungen ergeben. Für die Routenwahl wird folglich im Gegensatz zur Ziel- und Moduswahl der Einfluss der veränderten Zeitwahrnehmung nicht für den Modus Pkw-Fahrer nach dem AV-Anteil gemittelt, sondern wird separat über den Routenwiderstand für das Verkehrssystem AV abgebildet.

Der Widerstand ist das Kriterium, das in einer Gleichgewichtsumlegung für jede Route berechnet wird. Das Ziel des deterministischen Nutzergleichgewichts ist es, dass alle gewählten Routen einer Relation denselben Widerstand pro Verkehrssystem aufweisen und damit im Gleichgewicht sind. Routenwiderstände setzen sich aus den Widerständen einzelner Netzelemente, die Teil der Route sind, zusammen. Der Widerstand für

Netzelemente wird mit Widerstandsfunktionen berechnet. Ohne eine Anpassung der Widerstandsfunktionen gäbe es keine direkte Rückkopplung von empfundener Fahrtzeit zur Routenwahl, da den Fahrer-Fahrzeug-Einheiten keinerlei Informationen über empfundene Fahrtzeitvorteile auf bestimmten Streckenabschnitten vorliegen würden. Daher ist es notwendig, die Widerstandsfunktionen so anzupassen, dass die Wahrnehmung der automatisierten Fahrtzeit für die Routenwahl möglichst gut den obigen Annahmen entspricht.

Die Modifikation von Widerstandsfunktionen wirkt nur direkt auf den Widerstand einzelner Netzelemente. Damit lässt sich kein Grenzwert, der eine Wahrnehmungsschwelle für automatisierte Fahrtzeit repräsentiert, einbinden. Mit der Anwendung desselben Parameters $\beta_{t,s}^{autom}$ wie für die Ziel- und Moduswahl würde der Einfluss des wahrgenommenen Zeitvorteils für die Routenwahl überschätzt werden. Die empfundene Fahrtzeit, und somit der Widerstand jedes automatisiert befahrbaren Netzelements würde unmittelbar in vollem Ausmaß reduziert werden. Die Annahmen müssen folglich angepasst werden. Für die Einstellungen red-15 und red-30 wird die Reduktion von tatsächlicher automatisierter Fahrtzeit pauschal um ein Drittel verringert. Formel (53) zeigt, wie sich der Parameter für die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit mit dieser Annahme für die Routenwahl berechnet. Mit $\beta_t^{red} = 0,6\bar{6}$ ergeben sich die aktualisierten Annahmen für die Routenwahl in Tabelle 10.

$$\beta_{t,s}^{autom} = 1 - \beta_t^{red} \cdot (1 - \beta_t^{autom}) \tag{51}$$

mit

$\beta_{t,s}^{autom}$ Wahrnehmungsparameter für automatisierte Fahrtzeit auf Ebene der Netzelemente s , einheitenlos

β_t^{red} Anpassungsfaktor, einheitenlos

β_t^{autom} Wahrnehmungsparameter für automatisierte Fahrtzeit, einheitenlos

Name	Beschreibung	Parameter für Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit	
		Wahrnehmungsparameter	Grenzwert in min
normal	Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit entspricht der Wahrnehmung manueller Fahrtzeit	$\beta_{t,s}^{autom} = 1,00$	nicht anwendbar
red-15	Die automatisierte Fahrtzeit wird als 10 % kürzer wahrgenommen	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,90$	nicht anwendbar
red-30	Die automatisierte Fahrtzeit wird als 20 % kürzer wahrgenommen	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,80$	nicht anwendbar

Tabelle 10: Name, Beschreibung und Parameter für die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit für die Routenwahl.

Vergleicht man die Annahmen für Ziel- und Moduswahl mit denen für die Routenwahl, können sich je nach Fahrdauer unterschiedliche, empfundene Fahrtzeiten ergeben, die

auf die jeweiligen Modellstufen wirken. Für eine automatisierte Fahrtzeit von 30 min stimmt die empfundene, automatisierte Fahrtzeit für beide Vorgehensweisen überein.

5.5.2 Umsetzung

Die Umsetzung beschreibt, was für die Integration der Modellierungsmethode inklusive der Annahmen erforderlich ist. Aufgrund der unterschiedlichen Annahmen für die Modellstufen wird die Umsetzung ebenfalls getrennt erläutert.

Ziel- und Moduswahl

Die Umsetzung für die Ziel- und Moduswahl erfordert folgende Attribute:

- Parameter für Zeitwahrnehmung automatisierter Fahrtzeit, auf Netzebene,
- Grenzwert für Zeitwahrnehmung automatisierter Fahrtzeit, auf Netzebene,
- Automatisierte Fahrtzeit, auf Ebene der Netzelemente,
- AV-ready-Eigenschaft, auf Ebene der Netzelemente,
- AV-Anteil in der Pkw-Flotte, auf Netzebene.

Die automatisierte Fahrtzeit auf einem Netzelement entspricht der tatsächlichen Fahrtzeit, wenn das Netzelement AV-ready ist.

Ferner werden folgende Matrizen benötigt:

- Benutzerdefinierte Kenngrößenmatrix (KGM) für automatisierte Fahrtzeit AV,
- KGM für nichtautomatisierte Fahrtzeit AV,
- KGM für empfundene automatisierte Fahrtzeit AV,
- KGM für empfundene Fahrtzeit AV,
- KGM für empfundene Fahrtzeit des Modus Pkw-Fahrer.

Bei Matrizen lassen sich generell Daten- und Formelmatrizen unterscheiden. Werte in Datenmatrizen werden direkt durch eine Kenngrößenberechnung gesetzt oder stammen aus anderen Datenquellen. Formelmatrizen berechnen die Matrixwerte nach einer vorgegebenden Berechnungsvorschrift und können auf die Werte anderer Matrizen oder Attribute von Netzelementen zugreifen. Die Werte in Formelmatrizen sind stets aktuell.

In VISUM können neben Standardkenngrößen auch spezielle, benutzerdefinierte Kenngrößen berechnet und in einer Matrix gespeichert werden. In diesem Fall werden die automatisierten Fahrtzeiten aller Netzelemente (Strecken, Abbieger) für jede Relation über eine Gewichtung mit der Belastung gemittelt. Die anderen Kenngrößenmatrizen werden als Formelmatrizen angelegt und wie folgt beschrieben genutzt.

Aus der Differenz der KGM Fahrtzeit des Verkehrssystems AV und der benutzerdefinierten KGM für die automatisierte Fahrtzeit kann die KGM für nichtautomatisierte Fahrtzeit bestimmt werden. Die automatisierten Fahrtzeiten werden dann mithilfe von Wahrnehmungsparemeter und Grenzwert nach Formel (52) zu empfundenen automatisierten

Fahrtzeiten umgerechnet. Das Ergebnis steht in der KGM der empfundenen automatisierten Fahrtzeit.

$$t_{od}^{AV,autom,perc} = \begin{cases} t_{od}^{AV,autom} & , t_{od}^{AV,autom} \leq t^l \\ t^l + \beta_t^{autom} \cdot (t_{od}^{AV,autom} - t^l) & , t_{od}^{AV,autom} > t^l \end{cases} \quad (52)$$

mit

$t_{od}^{AV,autom}$ Automatisierte Fahrtzeit für Verkehrssystem AV von Quelle o zu Ziel d

$t_{od}^{AV,autom,perc}$ Empfundene automatisierte Fahrtzeit für AV von Quelle o zu Ziel d

Die Addition dieser empfundenen automatisierten Fahrtzeit mit der nichtautomatisierten Fahrtzeit ergibt die empfundene Fahrtzeit für das Verkehrssystem AV. Die zugehörige KGM wird mit der KGM der Fahrtzeit von CV nach AV-Anteil gewichtet gemittelt und bildet die KGM der empfundenen Fahrtzeit für den Modus Pkw-Fahrer. Diese ersetzt in den Nutzenfunktionen der kombinierten Ziel- und Moduswahl die ursprüngliche KGM. Die Vorgehensweise ist als Graph in Abbildung 22 dargestellt.

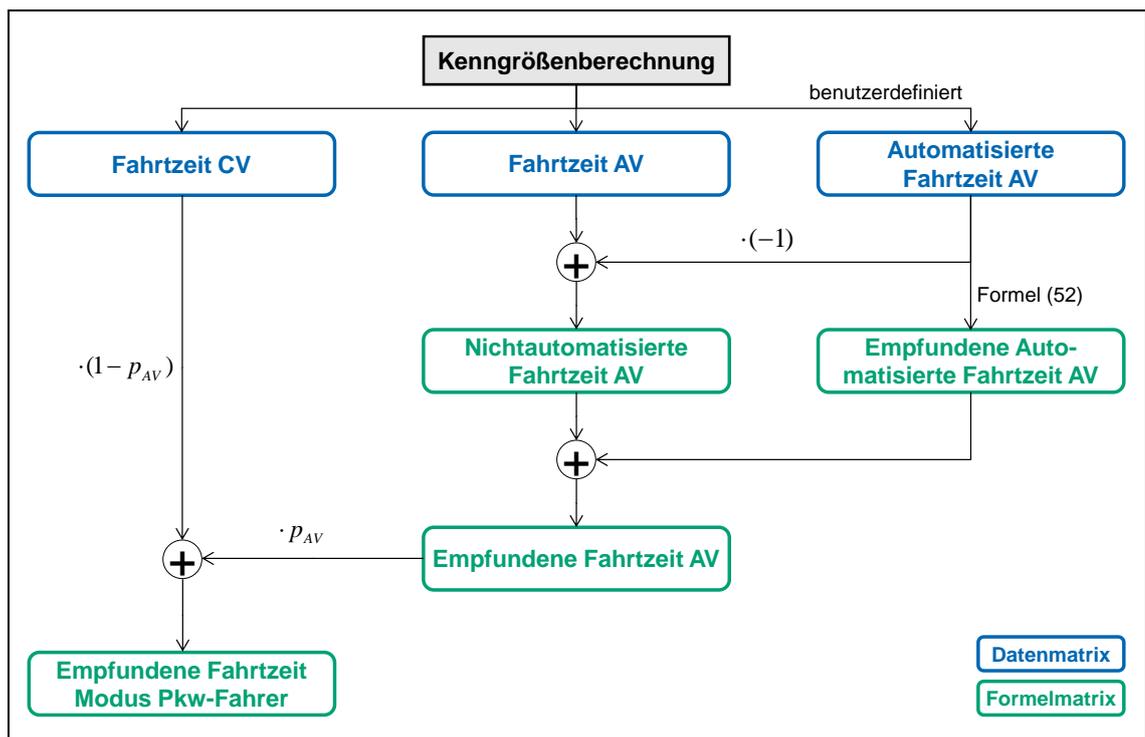


Abbildung 22: Vorgehen für die Berechnung der empfundenen Fahrtzeitenmatrix für den Modus Pkw-Fahrer.

Die benutzerdefinierte Kenngroßenberechnung der automatisierten Fahrtzeit unterliegt der softwareseitigen Limitierung, dass bei der Addition der automatisierten Fahrtzeiten einzelner Netzelemente nicht danach unterschieden werden kann, ob diese Fahrtzeiten aus unmittelbar aufeinanderfolgenden Netzelementen stammen oder nicht. Es ist also

nicht möglich, die Summe von Attributwerten zusammenhängender Netzelemente innerhalb von Wegen, die ein gewisses Kriterium erfüllen, zu bestimmen.

Für die Umsetzung der Modellierungsmethode in VISUM lässt sich lediglich für eine bestehende Umlegung die Fahrdauer jeder Relation, die auf automatisierten Netzelementen zurückgelegt wird, identifizieren. Daraus folgt, dass keine Unterscheidung zwischen einer automatisierten Fahrdauer eines zusammenhängenden Fahrtabschnittes oder der summierten automatisierten Fahrdauer mehrerer Fahrtabschnitte erfolgt. Es kommt zu einer Überschätzung des wahrgenommenen Zeitvorteils, falls der Wechsel von AV-ready Netzelementen zu nicht-AV-ready Netzelementen und zurück mindestens einmal passiert. Mehrere kurze Pausen von der Fahraufgabe sind in der Wahrnehmung höchstwahrscheinlich nicht mit einer längeren Pause gleichzusetzen.

Durch die Hierarchie der Straßenklasse, die mit den VFS in den RIN (FGSV (2008)) korreliert, und der Möglichkeit – je nach AV-ready Netz – auf der höchsten Straßenklasse oder den höchsten Straßenklassen automatisiert zu fahren, sollte dieser Fall nicht die Regel sein. Es wird erwartet, dass Reisende die automatisiert befahrbaren Straßenklassen nicht mehrfach innerhalb eines Weges verlassen, um zu nichtautomatisiert befahrbaren Straßenklassen zu wechseln. Für die Fälle, in denen mehrere Fahrtabschnitte automatisiert ablaufen, schwächt der Grenzwert für die Zeitwahrnehmung diese Inkonsistenz ab.

Detaillierte Hinweise zum Vorgehen für verschiedene Softwareversionen von VISUM sind in SONNLEITNER UND FRIEDRICH (2020b) und zugehöriger Programmcode in SONNLEITNER UND FRIEDRICH (2020a) verfügbar.

Routenwahl

Die Umsetzung der Methode für die Routenwahl benötigt die folgenden Attribute:

- Parameter für Zeitwahrnehmung automatisierter Fahrtzeit auf Netzebene,
- Anpassungsfaktor für Zeitwahrnehmung automatisierter Fahrtzeit auf Netzebene,
- AV-ready-Eigenschaft auf Ebene der Netzelemente.

Mit einem Anpassungsfaktor auf Netzebene lässt sich die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit im Vergleich zur Wirkung bei Ziel- und Moduswahl flexibel für Netzelemente ändern. Statt eines Anpassungsfaktors, der auf den bestehenden Parameter für die Zeitwahrnehmung angewendet wird, könnte auch direkt ein neuer Parameter für die Zeitwahrnehmung eingeführt werden, der den empfundenen Zeitvorteil aus den allgemeinen Annahmen direkt um ein Drittel reduziert.

Die Widerstandsfunktionen im VRS-Modell können für jedes Verkehrssystem auf verschiedenen Netzelementen (Strecken, Anbindungen, Abbieger, Oberabbieger) separat eingestellt werden und basieren stets auf der Fahrtzeit im belasteten Zustand.

Widerstandsfunktionen für das Verkehrssystem AV auf den Netzelementen Strecken und Abbieger werden basierend auf den Formeln (43) und (51) gemäß Gleichung (53) modifiziert. Durch das Belegen des Attributs für die AV-ready-Eigenschaft von null oder

eins ist deshalb keine Fallunterscheidung innerhalb der Widerstandsfunktionen notwendig. Für Fahrtauern auf nicht-AV-ready Netzelementen erfolgt automatisch keine Anpassung.

$$w_{t,s}^{AV} = \beta_{t,s} \cdot \left(1 - \beta_s^{AV-ready} \cdot \beta_t^{red} \cdot \left(1 - \beta_t^{autom}\right)\right) \cdot t_s^{AV} \quad (53)$$

mit

$\beta_s^{AV-ready}$ AV-ready-Parameter für Netzelement s , wenn AV-ready: 1, sonst 0

5.6 Umlegungsverfahren

Als Routenwahlmodell wird ein statisches, deterministisches Nutzergleichgewicht angewendet. Durch das Vorkommen mehrerer Verkehrssysteme, handelt es sich um eine Simultanumlegung. Die CR-Funktionen sind hinsichtlich aller Belastungen aller Verkehrssysteme kontinuierlich. Damit wird gewährleistet, dass eine Lösung für streckenbezogene Verkehrsstärken in Pkw-Einheiten gefunden werden kann.

Der Konvergenznachweis für eine Lösung erfolgt über die Vorgabe des Relative Gap. Dieser gibt, wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, an, in welchem Umfang der tatsächliche Verkehrszeitaufwand einer aktuellen Lösung von dem hypothetischen Verkehrszeitaufwand abweicht, der entsteht, wenn alle Fahrzeuge die kürzeste Route wählen. Die Vorgabe für die Modellanwendung ist $G = 5,0 \cdot 10^{-6}$ und damit strenger als der von BOYCE ET AL. (2004) angegebene mindestens zu unterschreitende Wert von $G = 1,0 \cdot 10^{-4}$ für eine stabile Konvergenz.

Die CR-Funktionen sind auch streng monoton steigend, was notwendig für die Eindeutigkeit einer Lösung ist. Jedoch liegt Asymmetrie für die Simultanumlegung vor, weil die Verkehrssysteme sich gegenseitig unterschiedlich stark beeinflussen, da nicht alle PE-Faktoren identisch sind. Damit kann nicht garantiert werden, dass eine eindeutige Lösung für die Aufteilung aller Verkehrssysteme auf Routen in der Umlegung gefunden werden kann.

Um diese Problematik zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 23 drei Beispiele für verschiedene Routenaufteilungen. Dabei wird durch eine Umlegung die Nachfrage von CV und AV auf zwei Routen für eine Quelle-Ziel-Relation verteilt. AV werden mit dem PE-Faktor von 0,8 in der Umlegung berücksichtigt. Beide Routen haben dieselben Eigenschaften und alle Netzelemente sind AV-ready. Der Netzabschnitt von Aufteilung bis Zusammenführung beider Routen wird als Netzmasche bezeichnet.

Alle drei Lösungen erfüllen das Nutzergleichgewicht, weil auf beiden Routen die Belastung mit 690 Pkw-Einheiten und damit die Widerstände identisch sind. Die Lösungen unterscheiden sich aber darin, wie viele Fahrzeuge welchen Verkehrssystems rechts oder links in der Netzmasche entlangfahren. Die Annahme für das deterministische Nutzergleichgewicht ist, dass vollständige Informationen für alle Verkehrsteilnehmenden

vorliegen, sodass es keinen Grund dafür gibt, dass sich Verkehrssysteme unterschiedlich verhalten sollten.

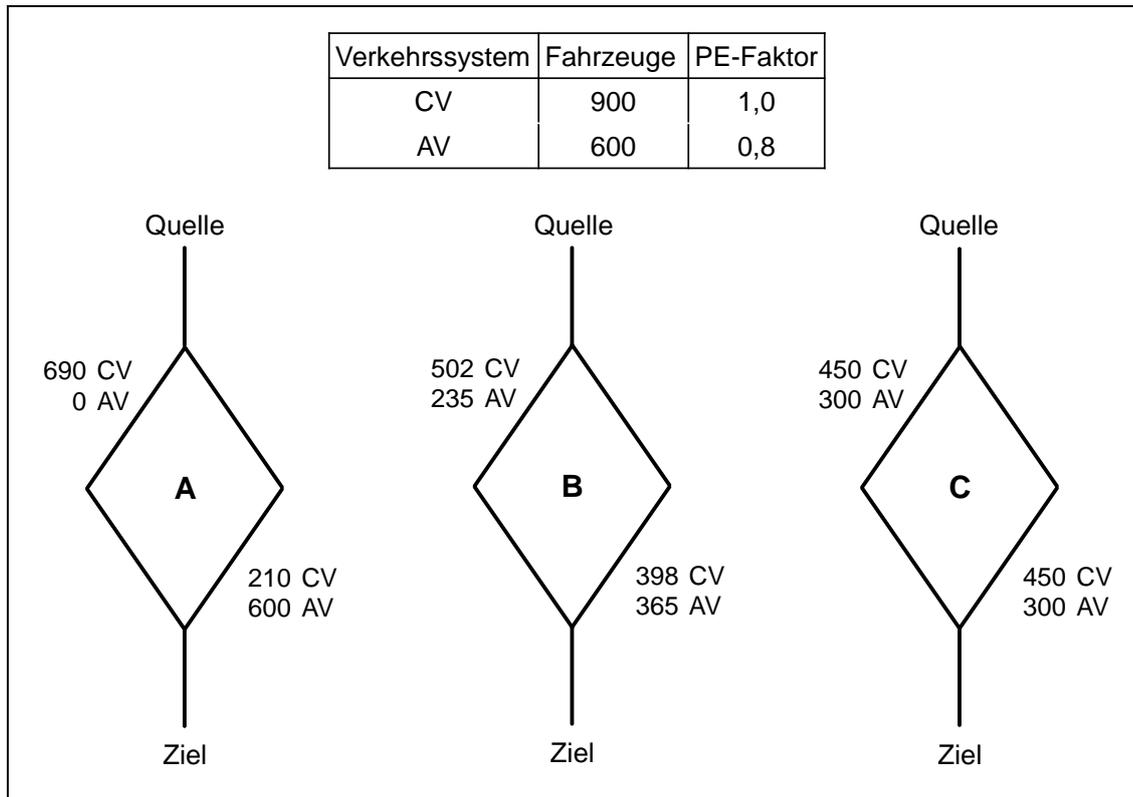


Abbildung 23: Aufteilung der Nachfrage zweier Verkehrssysteme auf zwei Routen.

Die Aufteilung von Beispiel A ist sehr unwahrscheinlich, da eine der beiden Routen nur von CV befahren wird. Der Fall B zeigt eine Lösung mit höherer Eintrittswahrscheinlichkeit, da beide Routen von beiden Verkehrssystemen genutzt werden. Jedoch liegt nur für Beispiel C Routenproportionalität vor, weil beide Routen von beiden Verkehrssystemen gleichermaßen genutzt werden. Lösung C ist damit die eindeutige Lösung auf Routenebene.

Ein weiteres Beispiel mit derselben Problematik ließe sich auch nur mit einem Verkehrssystem konstruieren. Sollte Nachfrage aus mehreren Relationen über die gleiche Netzmasche führen, sollte die Aufteilung der Belastungen für die Nachfrage jeder Relation proportional auf die Routenalternativen der Netzmasche erfolgen.

Für die Modellanwendung in VISUM muss ein geeignetes Umlegungsverfahren gewählt werden. VISUM stellt mehrere Umlegungsverfahren zur Verfügung, die ein deterministisches Nutzergleichgewicht ermitteln sollen, lässt aber auch keine Implementierung anderer Verfahren zu. Die Möglichkeit, die Routenproportionalität einzustellen, ist nur bei einem Verfahren verfügbar, das von GENTILE UND NOEKEL (2009) entwickelt wurde. Für die Gleichgewichtsumlegung LUCE (Linear User Cost Equilibrium) kann Routenproportionalität optional aktiviert werden.

Die Eigenschaft der Routenproportionalität ist erstrebenswert für die Umlegung, damit die Lösung auf Routenebene für alle Verkehrssysteme eindeutig ist. Die ersten Rechenläufe zeigen allerdings, dass die Rechenzeit für die Umlegung sich mit Aktivierung der Funktion für Routenproportionalität ungefähr verdreifacht bis vervierfacht. Für die Untersuchung einer großen Anzahl von Szenarien ist dieser Zuwachs für diese Arbeit nicht tragbar. Daher wird die Gleichgewichtsumlegung LUCE ohne aktivierte Routenproportionalität in der Modellanwendung genutzt.

Es muss jedoch geprüft werden, welchen Einfluss die Routenproportionalität auf die Ergebnisse hat. Für 16 Szenarien werden mit aktivierter Routenproportionalität zusätzliche Rechenläufe durchgeführt, um abschätzen zu können, welchen Unterschied die Funktion für die Ergebnisse zur Folge hat. Die Szenarien werden so ausgesucht, dass verschiedene Annahmen für AV-ready Netze, Einflüsse aus der Leistungsfähigkeit und aus der Zeitwahrnehmung für AV abgedeckt sind.

Der Vergleich zeigt, dass das Berücksichtigen der Routenproportionalität innerhalb der Gleichgewichtsumlegung LUCE geringfügige Änderungen in den Ergebnissen verursacht. Tabelle 11 listet Minimum, Maximum, Median und Durchschnitt der Abweichungen für verschiedene Kenngrößen für den Modus Pkw-Fahrer für Wege mit Start und Ziel in der Region Stuttgart, die aus Matrizenauswertungen stammen, auf.

Abweichung	mittlere Fahrtweite	mittlere Fahrtzeit	Verkehrsleistung	Verkehrszeitaufwand
Minimum	-0,2 %	-0,8 %	-0,2 %	-0,4 %
Maximum	-0,1 %	+1,3 %	-0,1 %	+0,0 %
Median	-0,1 %	-0,2 %	-0,1 %	-0,1 %
Durchschnitt	-0,1 %	-0,2 %	-0,1 %	-0,1 %

Tabelle 11: Abweichungen der Ergebnisse für Modus Pkw-Fahrer aus Kenngrößenmatrizen der Stichprobe mit und ohne Routenproportionalität.

Die Abweichungen beziehen sich dabei auf alle 16 Szenarien und den direkten Vergleich einer jeder Kenngröße mit und ohne Routenproportionalität. Negative Werte bedeuten eine Verringerung des Wertes mit aktivierter Routenproportionalität, was für die allermeisten Szenarien und Kenngrößen der Fall ist. Abweichungen in der Größenordnung, die Median und Durchschnitt für die Stichprobe zeigen, scheinen, bezogen auf Aussagen für den Modus Pkw-Fahrer in der Region Stuttgart, vernachlässigbar zu sein.

Der Vergleich für die Pkw-Verkehrssysteme CV und AV aus der Netzauswertung für die Netzelemente Strecken und Abbieger in der Region Stuttgart ist in Tabelle 12 zu finden. Hierbei werden die Kenngrößen Verkehrsleistung und -zeitaufwand für die gesamte Region und nach Straßenklasse getrennt ausgewertet.

Für das gesamte Netz der Region Stuttgart ergeben sich tendenziell negative Abweichungen durch die Routenproportionalität in einem Ausmaß, das sich so bereits in der Matrizenauswertung gezeigt hat. Größere Unterschiede, die die einzelnen Straßenklassen betreffen, gleichen sich offenbar in Summe wieder teilweise aus. Für die

Straßenklassen S1 bis S3 liegen die Werte ebenfalls ungefähr im Bereich der Matrixauswertung. Die größten negativen Abweichungen für die Klasse S2 bilden hier die Ausnahme: drei der 16 Szenarien weisen für beide Kenngrößen negative Abweichungen kleiner -0,5 % aus. Für die Straßenklasse S4 gibt es für einzelne Szenarien größere Unterschiede durch die Routenproportionalität. Abweichungen, die sich auf Straßenklassen beziehen, sollten allerdings immer im Kontext des Anteils der Kenngrößen, der auf diese Straßenklasse entfällt, betrachtet werden. Die größeren Abweichungen für S2 und besonders S4 relativieren sich durch deren geringe Anteile an der Pkw-Verkehrsleistung (S2: 15 % und S4: 3 %) und am Pkw-Verkehrszeitaufwand (S2: 17 % und S4: 9 %).

Abweichung	Verkehrsleistung					Verkehrszeitaufwand				
	Alle	S1	S2	S3	S4	Alle	S1	S2	S3	S4
Minimum	-0,2 %	-0,4 %	-1,1 %	-0,5 %	-3,1 %	-0,4 %	-0,5 %	-1,2 %	-0,6 %	-3,0 %
Maximum	-0,0 %	+0,1 %	+0,0 %	+0,4 %	+2,5 %	+0,0 %	+0,2 %	+0,0 %	+0,5 %	+2,0 %
Median	-0,1 %	+0,1 %	-0,2 %	-0,1 %	-0,6 %	-0,1 %	+0,1 %	-0,2 %	-0,1 %	-0,7 %
Durchschnitt	-0,1 %	-0,1 %	-0,3 %	-0,1 %	-0,2 %	-0,1 %	-0,1 %	-0,3 %	-0,1 %	-0,3 %

Tabelle 12: Abweichungen der Ergebnisse für Verkehrssysteme CV und AV aus der Netzauswertung der Stichprobe für die Region Stuttgart mit und ohne Routenproportionalität.

Das Ausmaß der Abweichungen aus der Netzauswertung wird als vertretbar angesehen, sodass ein Umlegungsverfahren ohne Routenproportionalität in der Modellanwendung zum Einsatz kommt.

5.7 Übersicht zu Szenarien

Ein Szenario kombiniert die Annahmen und Varianten, die in den vorangegangenen Kapiteln 5.2 bis 5.5 vorgestellt wurden. Den Rahmen dafür bildet die Szenariengruppe, die die Phasen der Koexistenz und die separate Gruppe Original umfasst. Die Szenariengruppe legt fest, ob und wie die Leistungsfähigkeit von AV eingehen soll. Wird diese berücksichtigt, legt die Phase der Koexistenz fest, welche AV-Klasse und welche drei AV-Anteile für die private Pkw-Flotte modelliert werden. Ohne die Anpassung der Leistungsfähigkeit von AV werden Durchdringungsraten von 20 % bis 100 % untersucht.

Einen weiteren Baustein stellt die Annahme zum Ausmaß veränderter Zeitwahrnehmung in AV dar. Falls die Leistungsfähigkeit von AV nicht angepasst werden soll, erübrigt sich die Annahme einer unveränderten Zeitwahrnehmung, da sonst keinerlei AV-spezifische Einflüsse wirken. Für die anderen Szenarien werden alle drei Ausprägungen für die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit herangezogen. Sofern es eine veränderte Zeitwahrnehmung gibt, greift diese nur für die automatisierte Fahrdauer, die 10 min übersteigt.

Schließlich gibt das AV-ready Netz vor, auf welchen Straßen(klassen) AV überhaupt automatisiert fahren können und dementsprechend Änderungen auftreten. Dabei kommen grundsätzlich die Netzvarianten N1 bis N3 in Frage. Die Untersuchung von N4 als AV-ready liefert keine Erkenntnisse, da für die zusätzlich beinhaltete Straßenklasse S4 unterstellt wird, dass AV dort nicht automatisiert fahren können.

Abbildung 24 zeigt die Zusammensetzung der Szenarien und die zugehörigen Kapitel, in denen die Annahmen und Varianten definiert und erläutert werden. Alle Kombinationen der dargestellten Ausprägungen ergeben 111 Szenarien.

Mit Sensitivitätstests wird der Einfluss der Modellparameter auf das Ergebnis geprüft. Sensitivitätstests sollen vor allem für Parameter durchgeführt werden, deren Ausprägung aufgrund unzureichender Daten nicht ausreichend kalibriert werden können.

Da die Annahmen für die Leistungsfähigkeit automatisierter Fahrzeuge bereits viele Wertebereiche abdecken und teils eine höhere, teils eine geringere Leistungsfähigkeit im Vergleich zu CV abdecken, wird auf zusätzliche Variationen der PE-Faktoren verzichtet. Zur Überprüfung der Sensitivität bezüglich des AV-ready Netzes und des Grenzwerts für die Zeitwahrnehmung werden zusätzliche Szenarien konstruiert. Tabelle 13 beinhaltet die Eckdaten der neuen Szenariengruppen mit den berücksichtigten Annahmen.

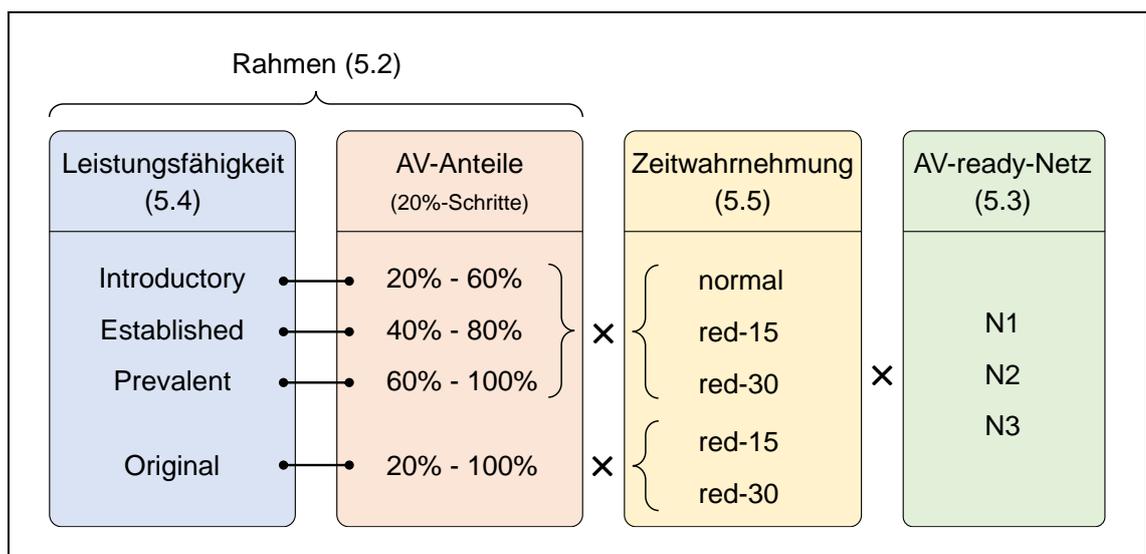


Abbildung 24: Zusammensetzung der Szenarien.

Szenariengruppe	Kurzbeschreibung	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Anzahl
Prevalent-Extreme (Pr-Ex)	Advanced AV fahren auf Straßenklasse S4 mit der Fahrverhaltenslogik Normal (wie auch auf S3).	normal, red-15, red-30	N4	9
Original-t5 (Orig-t5)	Der Grenzwert für die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit wird auf 5 min gesetzt: $t^l = 5$	Für Ziel- und Moduswahl abgesehen von Grenzwert wie red-15, red-30; Für Routenwahl wie red-15, red-30	N1, N2, N3	30
Original-t0 (Orig-t0)	Der Grenzwert für die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit wird auf 0 min gesetzt bzw. entfällt: $t^l = 0$	Für Ziel- und Moduswahl abgesehen von Grenzwert wie red-15, red-30; Für Routenwahl gilt: $\beta_{t,s}^{autom} = \beta_t^{autom}$	N1, N2, N3	30

Tabelle 13: Beschreibung zusätzlicher Szenarien.

Szenarienreihen

Die Darstellung der Ergebnisse in Kapitel 6 erfolgt mithilfe von Szenarienreihen. Dabei werden mehrere Szenarien in einer Reihe mit dem Basisszenario verglichen, sodass die Ergebnisse und Unterschiede möglichst übersichtlich zu sehen sind. Das Basisszenario entspricht dem Prognose-Nullfall des Bezugsfalls des VRS-Modells für das Jahr 2025 ohne AV. Eine Szenarienreihe repräsentiert einen möglichen Verlauf, der AV-Anteile von 0 % bis 100 % abdeckt. Die Kennung Base bezeichnet immer das Basisszenario.

Die Szenarien der Gruppen Introductory, Established und Prevalent werden zusammen mit dem Basisszenario stets zu einer Szenarienreihe zusammengeschlossen. Somit ergeben sich neun Szenarienreihen, die sich in AV-ready Netz und Zeitwahrnehmung unterscheiden. Diese werden anhand der Annahme für die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit im Ergebniskapitel 6 in drei Unterkapitel aufgeteilt, die jeweils Ergebnisse zu allen drei Netzvarianten beinhalten. Ergebnisse zur Szenariengruppe Prevalent-Extreme befinden sich in einem separaten Unterkapitel.

Die Szenariengruppe Original umfasst gemeinsam mit dem Basisszenario bereits den Verlauf von 0 % bis 100 %. Es ergeben sich sechs Szenarienreihen, die in einem Unterkapitel zusammengefasst sind. Zusätzliche Szenarien mit der Variation des Grenzwerts für die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit werden ebenfalls in einem eigenen Unterkapitel diskutiert und mit den Ergebnissen des ursprünglichen Grenzwerts verglichen.

5.8 Zwischenfazit

Die Modellierungsmethoden sollen im makroskopischen Verkehrsnachfragemodell des Verbands Region Stuttgart angewendet werden. Dessen Planungsraum umfasst neben der Stadt Stuttgart fünf umliegende Landkreise. Die Nachfrageberechnung des Modells nutzt das aktivitätenbasierte Wegekettensmodell VISEM, bei dem auf die Modellstufe der Verkehrserzeugung die kombinierte Ziel- und Moduswahl folgt. In der Umlegung, die den Berechnungsablauf ergänzt, erfolgt die Routenwahl nach einem statischen und deterministischen Nutzergleichgewicht.

Für die Modellanwendung wird angenommen, dass AV hochautomatisiert sind. Dies erfordert eine Fahrerlaubnis und schließt Leerfahrten aus. Die Zeit von der Einführung von AV, bis sie die private Fahrzeugflotte vollständig durchdringen, wird in Phasen der Koexistenz eingeteilt, in denen jeweils eine bestimmte AV-Klasse mit verschiedenen AV-Anteilen auftritt.

Automatisierte Fahrzeuge können nur auf AV-ready Netzelementen automatisiert fahren. In der Modellanwendung sollen mehrere Varianten von AV-ready Netzen zum Einsatz kommen, die sich in den Straßenklassen, die AV-ready sind, unterscheiden. Die AV-ready Netze beinhalten beginnend mit der höchsten Straßenklasse, die Autobahnen und ähnliche Straßen repräsentiert, in den weiteren Varianten jeweils eine zusätzliche Straßenklasse. Die Einteilung der Netzelemente in diese Klassen orientiert sich hauptsächlich am Ausbauzustand.

Die Integration der Modellierungsmethoden für Leistungsfähigkeit und Zeitwahrnehmung erfordert Annahmen. Diese basieren teilweise auf Beobachtungen von Experimenten mit AV-Prototypen, teils auf Erwartungen und teils auf Erkenntnissen aus der Literatur. Da die Wirkung von AV noch unbekannt ist, ist eine Variation der Annahmen wichtig, um eine große Bandbreite von möglichen Auswirkungen abzudecken. Für die Umsetzung der Modellierungsmethoden werden Hinweise gegeben und Besonderheiten sowie softwareseitige Limitierungen erläutert.

Die Kombinationen aus den verschiedenen Ausprägungen der Annahmen ergeben Szenarien, die im Bezugsfall des VRS-Modells für das Jahr 2025 untersucht werden. Die Ergebnisse der Rechenläufe folgen im nächsten Kapitel.

6 Ergebnisse und Interpretation

Zunächst sollen die betrachteten Kenngrößen erläutert und für den Prognose-Nullfall des VRS-Modells, dem Basisszenario ohne AV, dargestellt werden. Es folgen die Ergebnisse für die im vorigen Kapitel vorgestellten Szenarien und die Interpretation derselben. Beurteilung und Diskussion der Ergebnisse ergänzen das Kapitel.

6.1 Kenngrößen

Das Modell ist in der Lage, eine große Anzahl von Kenngrößen, die die Verkehrsnachfrage, die Angebotsqualität und die Umweltauswirkungen beschreiben, zu berechnen. Die für die Modellanwendung relevanten Kenngrößen konzentrieren sich hauptsächlich auf die Verkehrsnachfrage und decken teilweise auch die Qualität des Verkehrsangebots ab.

Für den Binnenverkehr der Region Stuttgart, also Ortsveränderungen mit Start und Ziel innerhalb der Region inklusive des Verkehrszellenbinnenverkehrs, werden folgende Kenngrößen mit der Auswertung von Matrizen gewonnen:

- Verkehrsaufkommen als Anzahl der Wege,
- Verkehrsleistung in Personenkilometern und Fahrzeugkilometern,
- Verkehrszeitaufwand in Personenstunden und Fahrzeugstunden,
- Mittlere Geschwindigkeit in Kilometern pro Stunde,
- Mittlere Verlustzeit absolut, streckenbezogen, fahrtzeitbezogen in Minuten, Minuten pro Kilometer, Minuten pro Minuten,
- Mittlere Fahrtweite in Kilometern,
- Mittlere Fahrtzeit in Minuten,
- Fahrtweitenverteilung als Anteile von Klassen von Fahrtweiten,
- Fahrtzeitenverteilung als Anteile von Klassen von Fahrtzeiten,
- Rebound-Effekt zu Verkehrszeitaufwand und mittlerer Fahrtzeit.

Mit der Auswertung des Verkehrs auf den Netzelementen der Region, der Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehr einschließt, werden folgende Kenngrößen extrahiert:

- Verkehrsleistung in Fahrzeugkilometern,
- Verkehrszeitaufwand in Fahrzeugstunden.

Diese Kenngrößen können getrennt nach Gebieten (Region, Stadt, Zentrum) oder Straßenklassen und auch nur für bestimmte Verkehrssysteme ausgewiesen werden. Die Netzauswertung beinhaltet nur den umgelegten Verkehr und damit nicht den Binnenverkehr der Verkehrszellen.

Sämtliche distanz- und zeitbasierten Kenngrößen für Matrix- und Netzauswertung beinhalten die Werte, die sich durch die Netzelemente Strecken und Abbieger ergeben. Die

Werte in Kenngrößenmatrizen werden durch eine Gewichtung der Kenngrößen jeder Route einer Relation mit der zugehörigen Nachfrage, die die Route nutzt, gemittelt. Ausnahme hiervon bildet die Kenngrößenmatrix der Fahrtzeit im unbelasteten Zustand, die für die Berechnung der Verlustzeiten benötigt wird und für die es einen eindeutigen Wert für jede Relation gibt.

Ergebnisse zu allen erwähnten Kenngrößen für alle Szenarien sind im Anhang unter O zu finden. Im Abschnitt A2 wird das Vorgehen zur Berechnung des Rebound-Effekts erläutert. Die Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse zu Szenarienreihen in den Abschnitten 6.3 und 6.4 in diesem Kapitel konzentriert sich auf die wege-, distanz- und zeitbasierten Modal-Splits für die berechnete Nachfrage in der Region Stuttgart aus Matrizenauswertungen. Die vereinzelte Erläuterung anderer Kenngrößen ergänzt diese Auswertungen.

6.2 Prognose-Nullfall

Der Prognose-Nullfall entspricht dem Basisszenario und geht von einer Pkw-Flotte aus, die ausschließlich aus konventionellen Fahrzeugen besteht. Kenngrößen zum Modus Park & Ride werden nicht separat ausgewiesen, sondern sind als Teil von Pkw-Fahrer und ÖV in den Daten enthalten. Dies gilt ebenso für alle Szenarien mit AV wie auch das Zusammenfassen der Kenngrößen für die Modi Rad und Fuß.

Abbildung 25 zeigt den Modal-Split in drei Varianten für Wege mit Start und Ziel in Region bzw. Stadt Stuttgart. Der Modus Pkw-Fahrer weist in der Region für Wege, Verkehrsleistung und -zeitaufwand den größten Anteil auf: Für Wege und Zeitaufwand ist es jeweils knapp die Hälfte, für die Verkehrsleistung zwei Drittel.

In der Stadt sind die aktiven Modi Rad und Fuß sowie der ÖV stärker vertreten. Mit dem ÖV wird in der Stadt ein Viertel aller Wege zurückgelegt, ca. 40 % der Verkehrsleistung erbracht und gut die Hälfte der Zeit im Verkehr aufgewendet. Mit den aktiven Modi werden knapp 30 % der Wege in der Region und gut ein Drittel in der Stadt zurückgelegt, welche aufgrund der typischerweise kürzeren Weite bei der Verkehrsleistung zu kleinen Anteilen führen. Beim Verkehrszeitaufwand entspricht ihr Anteil in Region und Stadt 15-16 %. Anteile für Pkw-Mitfahrer orientieren sich an denen des Modus Pkw-Fahrer und entsprechen im Verhältnis zu deren Anteilen jeweils 14-20 % und bezogen auf den gesamten Modal-Split in den drei Varianten 5-9 %.

Abbildung 26 zeigt die Aufteilung der Verkehrsleistung und des Verkehrszeitaufwands der Pkw aus der berechneten Nachfrage auf Gebiete und Straßenklassen in der Region. Knapp 80 % der Verkehrsleistung werden in der Region exklusive der Stadt erbracht und knapp 18 % in der Stadt exklusive des Zentrums. Beim Zeitaufwand sind die Anteile für Stadt und Zentrum etwas größer, die durchschnittliche Geschwindigkeit dort etwas kleiner. Bei den Straßenklassen dominiert S3 mit etwas mehr als der Hälfte für beide Kenngrößen. Auf Straßen der Klasse S1 werden 30 % der Verkehrsleistung bei 20 % des

Zeitaufwands erbracht. Damit ist S1 die einzige Straßenklasse, bei der der Anteil des Zeitaufwands im Vergleich zur Leistung sinkt, was an den hohen Geschwindigkeiten auf dieser Straßenklasse liegt. Die Anteile für S3 betragen 15-17 %. Für 3 % der Verkehrsleistung auf Straßenklasse S4 werden 9 % des Verkehrszeitaufwands benötigt.

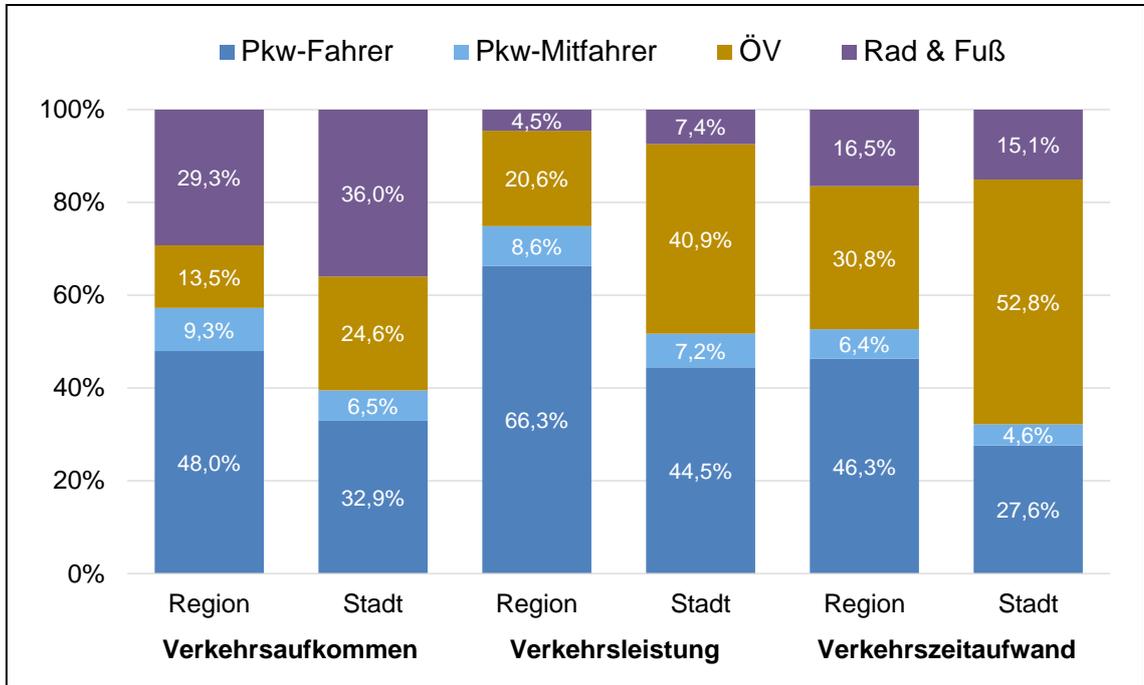


Abbildung 25: Modal-Split für die Region und Stadt Stuttgart.

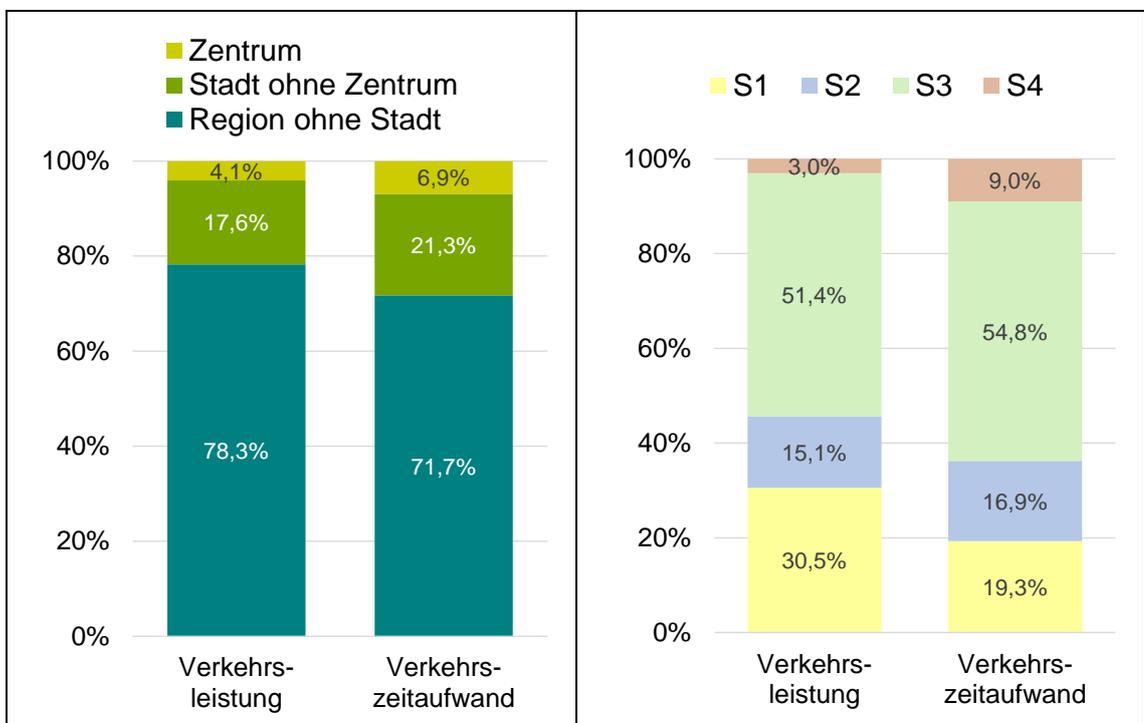


Abbildung 26: Aufteilung der Pkw-Fahrleistung und des Pkw-Zeitaufwands auf Gebiete und Straßenklassen aus der Netzauswertung.

Weitere Kenngrößen im Mittel für alle Ortsveränderungen mit dem Modus Pkw-Fahrer sind in Tabelle 14 zu finden. Im Basisszenario ist ein Weg mit dem Pkw im Schnitt ca. 10 km lang und dauert 15 min inklusive 4 min Verlustzeit. Die durchschnittliche Geschwindigkeit beträgt knapp 40 km/h.

Fahrtweite in km	Fahrtzeit in min	Geschwindigkeit in km/h	Verlustzeit in min	Verlustzeit / Fahrtweite in min pro km	Verlustzeit / Fahrtzeit in min pro min
9,7	14,8	39,5	4,1	0,42	0,28

Tabelle 14: Mittlere Werte von Kenngrößen für Pkw-Fahrer des Basisszenarios.

Abbildung 27 zeigt Verteilungen für Fahrtweiten und Fahrtzeiten von Pkw-Fahrer. Intervalle sind für beide Kenngrößen in 5er-Schritten vorgegeben. Über 40 % der Wege sind bis zu 5 km lang. Die Anteile der Klassen für die Fahrtweite sinken dann stärker als die der Fahrtzeit. Knapp ein Viertel der Ortsveränderungen dauern bis zu 5 min. Bis zur Klasse 40-45 km bzw. min sinken die Anteile für beide Kenngrößen. Im Vergleich dazu ist bei der letzten Klasse, die alle Wege über 45 km bzw. min einschließt, ein geringer Anstieg zu verzeichnen.

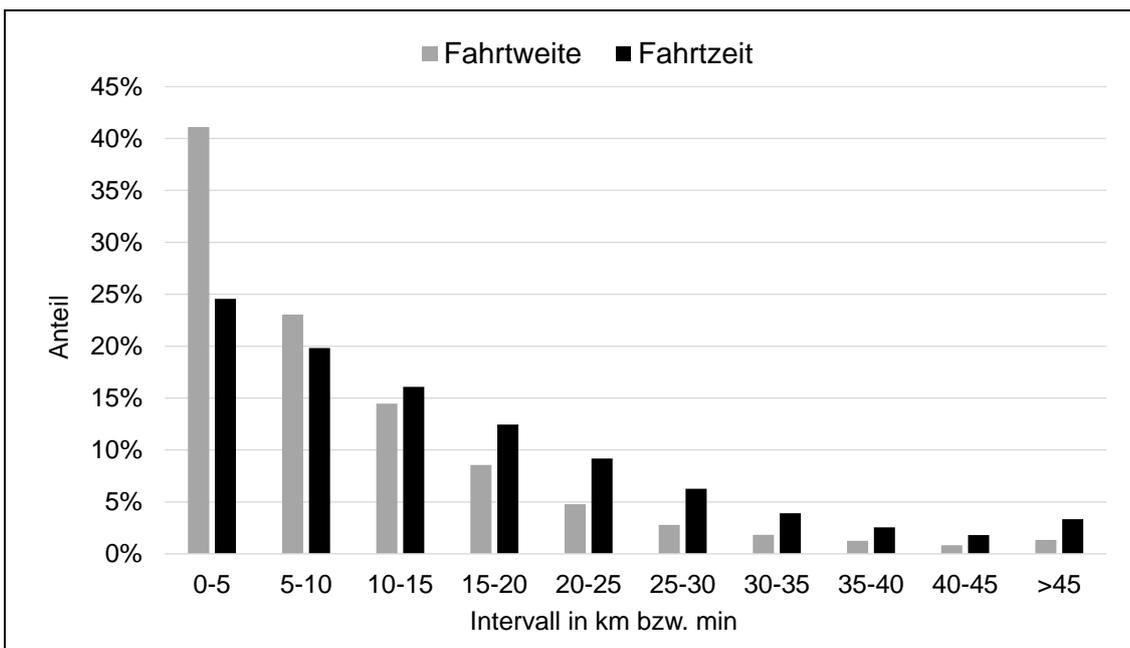


Abbildung 27: Fahrtweiten- und Fahrtzeitenverteilung für Wege des Modus Pkw-Fahrer im Basisszenario.

6.3 Szenariengruppen „Introductory, Established, Prevalent“

Als Erstes werden ausgewählte Ergebnisse zu den Szenarienreihen, die die Szenariengruppen Introductory, Established und Prevalent dem Basisszenario gegenüberstellen, vorgestellt. Jede Variation des Parameters für die Zeitwahrnehmung wird in einem

eigenen Unterkapitel behandelt. Dort werden die Modal-Splits des Verkehrsaufkommens, der Verkehrsleistung und des Verkehrszeitaufwands aus Matrizenauswertungen jeweils für alle drei Varianten des AV-ready Netzes in einer Abbildung präsentiert. Dies führt zu neun Abbildungen mit jeweils drei Diagrammen, die sich auf 18 Seiten verteilen. Auch wenn sich teilweise nur geringfügige Änderungen zwischen Diagrammen ergeben, werden alle Diagramme gezeigt, damit sich der Leser ein vollständiges Bild über die Ergebnisse machen kann, die sich aus den systematischen Änderungen der Annahmen ergeben.

Das Kapitel schließt mit Ergebnissen zu den Szenarien der Gruppe Prevalent-Extreme, bei denen alle Straßenklassen AV-ready sind.

Wiederholung der Annahmen

Eine zusammenfassende Wiederholung der Annahmen für die Leistungsfähigkeit innerhalb der Szenariengruppen und der Zusammenhänge zwischen Straßenklasse, AV-ready Netz und PE-Faktor ist in Anhang A1 oder Tabelle 15 zu finden. Die Kapitel 5.2 bis 5.4 stellen eine ausführlichere Beschreibung zur Verfügung.

Straßenklasse	enthalten in AV-ready Netz	Introductory (Intr)	Established (Esta)	Prevalent (Prev)
		Basic AV	Intermediate AV	Advanced AV
S1	N1, N2, N3, N4	1,20	0,77	0,73
S2	N2, N3, N4	1,26	0,81	0,76
S3	N3, N4	(n. a.) 1,00	1,32	0,85
S4	N4	(n. a.) 1,00	(n. a.) 1,00	(n. a.) 1,00

Tabelle 15: PE-Faktoren für AV-Klassen pro Straßenklasse (n. a. für nicht autom.).

Tabelle 16 fasst die Annahmen für Parameter, mit denen eine veränderte Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit umgesetzt wird, aus den Angaben in Tabelle 9 und Tabelle 10 zusammen. Es wird dabei nach Modellstufen unterschieden, da eine identische Umsetzung der Annahmen für die Ziel- und Moduswahl in der Routenwahl nicht möglich ist. Eine ausführliche Erläuterung hierzu befindet sich in Kapitel 5.5.

Name	Parameter für Ziel- und Moduswahl		Parameter für Routenwahl	
	Wahrnehmungsparameter	Grenzwert	Wahrnehmungsparameter	Grenzwert
normal	$\beta_t^{autom} = 1,00$	entfällt	$\beta_{t,s}^{autom} = 1,00$	entfällt
red-15	$\beta_t^{autom} = 0,85$	$t^l = 10 \text{ min}$	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,90$	nicht anwendbar
red-30	$\beta_t^{autom} = 0,70$	$t^l = 10 \text{ min}$	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,80$	nicht anwendbar

Tabelle 16: Name für angenommene Varianten der Zeitwahrnehmung in AV und zugehörige Parameter für Modellstufen.

6.3.1 Szenarienreihen „normal“

Die erste Szenarienreihe geht von einer unveränderten Zeitwahrnehmung automatisierter Fahrtzeit aus. Die Ergebnisse spiegeln also ausschließlich den Einfluss der Leistungsfähigkeit von AV wider.

Abbildung 28 zeigt den Modal-Split des Verkehrsaufkommens für die AV-ready Netze N1, N2 und N3. Die Anteile für alle Modi ergeben dabei stets 100 %, jedoch kann es durch die Anzeige gerundeter Zahlen dazu kommen, dass die Summe für ein Szenario davon um 0,1 % abweicht. Neben der Szenariengruppe gibt die Zahl in Klammern den AV-Anteil für ein Szenario auf der horizontalen Achse an.

Sollte das Netz N1 AV-ready sein, ist die Leistungsfähigkeit von AV auf der Straßenklasse S1 für Introductory-Szenarien schlechter als die von CV und in den Szenariengruppen Established und Prevalent besser. Dies wird jeweils durch PE-Faktoren repräsentiert, die größer oder kleiner als 1,0 sind, was dem PE-Faktor von CV entspricht. Die Änderungen der Anteile des Verkehrsaufkommens sind für das Netz N1 noch verhältnismäßig gering. Es treten beispielsweise eine Reduktion von 0,1 %p (Prozentpunkte) für Intr (60) oder ein Zuwachs von 0,2 %p in Prev (100) der Anzahl der Wege von Pkw-Fahrern auf.

Für das AV-ready Netz N2 sind die Änderungen deutlicher, da die Tendenz der Leistungsfähigkeit auf S2 mit der von S1 übereinstimmt und die abweichende Leistungsfähigkeit folglich auf mehr Straßen wirkt. Die Abweichungen im Vergleich zum Basisszenario verdoppeln sich ungefähr zum Netz N1.

Für Introductory-Szenarien und das Netz N3 treten keine weiteren Änderungen des Modal-Splits auf, da Basic AV auf Straßen der Klasse S3 nicht automatisiert fahren können und sich daher wie CV verhalten. Für die Szenariengruppe Established kommt es zu einer Reduktion des Anteils der Pkw-Modi, weil die Leistungsfähigkeit von AV auf S3 nun schlechter als die von CV ist. Dieser Umstand übertrifft die positiven Wirkungen auf den Verkehrsablauf auf den Klassen S1 und S2 insgesamt, sodass Pkw-Modi weniger attraktiv sind als ohne AV. Für Esta (80) verliert der Modus Pkw-Fahrer 0,2 %p. In den Prevalent-Szenarien weisen Advanced AV auch auf S3-Straßen einen geringeren PE-Faktor auf als CV, sodass die Pkw-Anteile am Verkehrsaufkommen weiter zunehmen und sich eine Erhöhung von bis zu 0,6 %p oder 1,3 % für Pkw-Fahrer einstellt.

Die Änderung des Anteils des Verkehrsaufkommens für den Modus Pkw-Fahrer korreliert mit der Leistungsfähigkeit von AV und ist innerhalb jeder Szenariengruppe proportional zum AV-Anteil. Eine höhere Leistungsfähigkeit wie in den Prevalent-Szenarien wirkt sich positiv auf den Verkehrsablauf und damit auf die Fahrtzeiten aus. Damit steigen die Angebotsqualität und die Erreichbarkeit für Pkw-Modi, was diese attraktiver macht und deren Anteil am Modal-Split steigen lässt. Entsprechend verlieren die aktiven Modi (Rad und Fuß) sowie der ÖV Anteile, wobei der ÖV verhältnismäßig stärker betroffen ist. Innerhalb der aktiven Modi nimmt die Anzahl der Wege, die mit dem Rad zurückgelegt werden, im Verhältnis stärker ab als die Zahl der Fußwege.



Abbildung 28: Modal-Split Verkehrsaufkommen für normal.

Abbildung 29 zeigt die Modal-Splits der Verkehrsleistung für drei AV-ready Netze. Alle Diagramme sind auf den Zustand des Basisszenarios normiert, der in Summe 100 entspricht. In den Szenarien ergeben sich nicht nur Änderungen innerhalb der Modi, sondern auch für die Summe der Verkehrsleistung über alle Modi. Diese Änderung ist für jedes Szenario als Zahl in einem Kasten über den Balken abgebildet.

Für das AV-ready Netz N1 nimmt die Verkehrsleistung des Modus Pkw-Fahrer und insgesamt in den Introductory-Szenarien ab. Für 60 % Basic AV sinkt sie um 1,1 % für Pkw-Fahrer, während die mittlere Fahrtweite um 0,9 % abnimmt. In den anderen beiden Szenariengruppen steigt die gesamte Verkehrsleistung. Für die Pkw-Fahrleistung ergeben sich Zunahmen von 1,9 % für Esta (80) und 2,8 % für Prev (100). Die mittleren Fahrtweiten aller Pkw-Fahrten für diese beiden Szenarien steigen um 1,6 % bzw. 2,4 %.

Mit automatisiert befahrbaren Straßen der Klasse S2 im Netz N2 verstärken sich die Wirkungen im Vergleich zum Netz N1, bleiben in der Tendenz aber identisch. Dies resultiert in Verkehrsleistungen für Pkw-Fahrer, die in Introductory um bis zu 1,8 % zurückgehen, für Established um bis zu 2,6 % und für Prevalent um bis zu 4 % ansteigen. Auch die Änderung bezüglich der mittleren Fahrtweite fällt deutlicher aus. Für die jeweils höchsten AV-Anteile belaufen sich diese auf -1,4 % für Introductory, +2,1 % für Established und +3,2 % für Prevalent.

In der Introductory-Gruppe gibt es für N3 keine Änderungen zu N2. Für Established-Szenarien treten nun nur noch geringe Zuwächse der gesamten Verkehrsleistung und der der Pkw-Fahrer (bis zu 0,5 %) auf. Im Vergleich zum Basisszenario ist der Anteil für diese Szenarien leicht rückläufig. Die mittlere Fahrtweite wird jedoch um bis zu 0,9 % länger, was dies mehr als ausgleicht. Für die drei Prevalent-Szenarien ergeben sich Steigerungen der Pkw-Fahrleistung von bis zu 5,2 %. Die durchschnittliche Fahrtweite ist für Prev (100) um knapp 4 % länger als im Basisszenario.

Die gesamte Verkehrsleistung und deren Änderung wird von der Verkehrsleistung der Pkw-Modi dominiert. Die Änderung der Verkehrsleistung der anderen Modi fällt jeweils kleiner aus und verhält sich umgekehrt.

Die Verkehrsleistung korreliert ebenfalls mit der Leistungsfähigkeit von AV und dem AV-Anteil. Änderungen ergeben sich durch modale Verlagerungen bezüglich des Verkehrsaufkommens und einer veränderten Ziel- und Routenwahl. Die durchschnittliche Fahrtweite trägt in größerem Ausmaß zu Veränderungen der Verkehrsleistung für Pkw-Modi bei als das Verkehrsaufkommen. Reduktionen oder Zuwächse der mittleren Fahrtweite sind innerhalb jeder Szenariengruppe proportional zum AV-Anteil.

Der Einfluss der veränderten Leistungsfähigkeit auf die Routenwahl zeigt sich in der Netzauswertung der Pkw-Fahrleistung auf den einzelnen Straßenklassen. Sofern eine bestimmte Straßenklasse AV-ready ist, sinkt deren Anteil an der Verkehrsleistung der Pkw-Fahrer verglichen mit dem Basisszenario für PE-Faktoren größer eins und steigt für PE-Faktoren kleiner eins. Ausnahme hiervon ist der Anteil der Verkehrsleistung auf S3 für Prevalent-Szenarien und Netz N3, der aufgrund der noch besseren Leistungsfähigkeit von AV auf den Straßenklassen S1 und S2 im Vergleich zu Base sinkt.

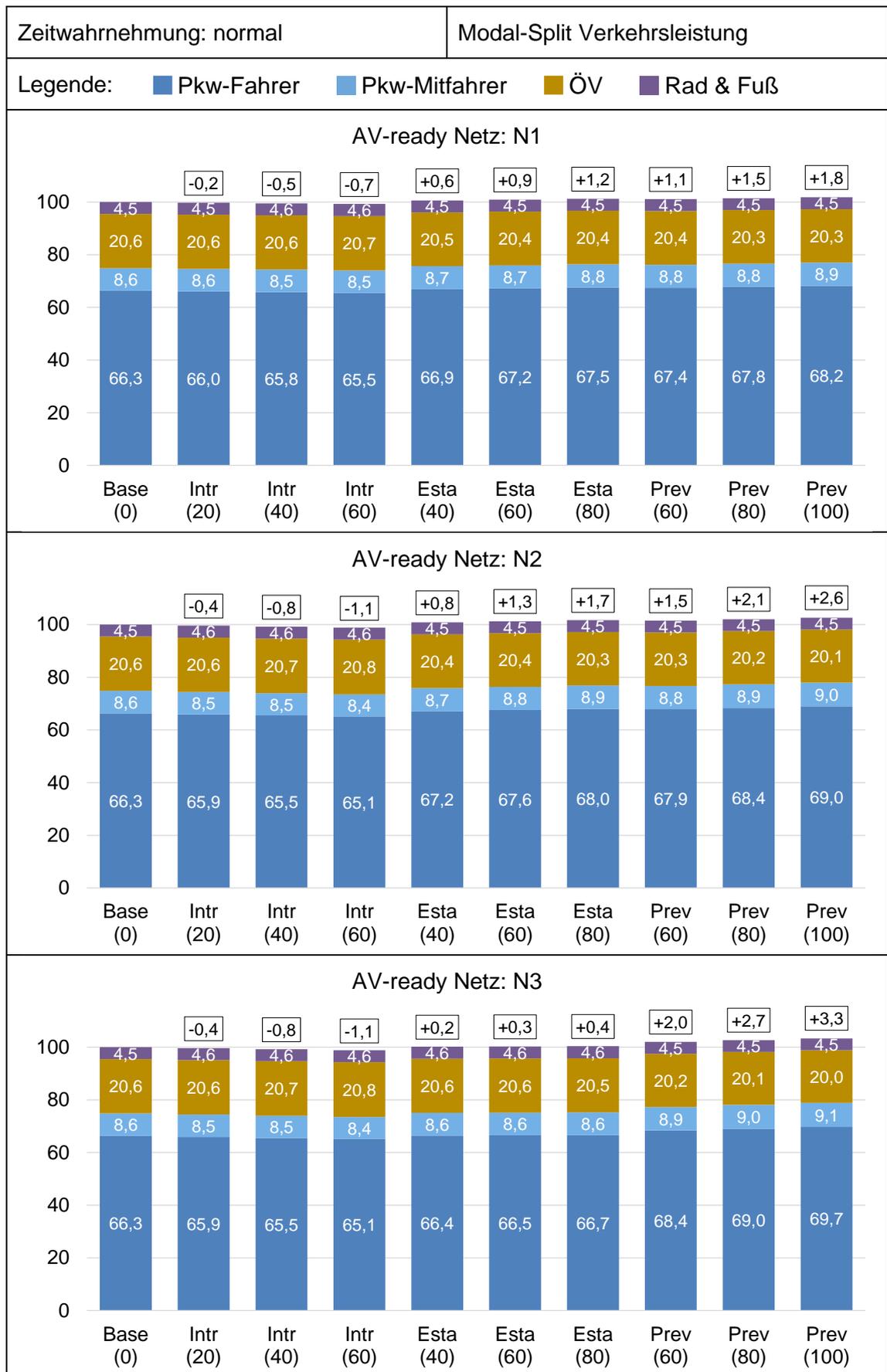


Abbildung 29: Modal-Split Verkehrsleistung für normal, normiert auf Base $\hat{=}$ 100.

Abbildung 30 zeigt den Verkehrszeitaufwand für die Szenarienreihe und unveränderter Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit. Die Art der Darstellung entspricht der der vorigen Abbildung zur Verkehrsleistung. Alle Werte sind zum Basisszenario normiert: Die Summe der Anteile aller Modi dafür entspricht der Zahl 100.

Für das AV-ready Netz N1 ergeben sich für den Zeitaufwand über alle Modi nur sehr geringe Änderungen. Für Introductory-Szenarien sind dies Erhöhungen, für die anderen Reduzierungen. Der Anteil für die Pkw-Modi bleibt beinahe unverändert, d. h. Änderungen des gesamten Verkehrszeitaufwands sind auf die aktiven Modi und den ÖV zurückzuführen, deren Zeitaufwand sich entsprechend den Anteilen im Verkehrsaufkommen verhält. Diese modalen Verlagerungen werden für die Pkw-Modi im Positiven wie im Negativen von der jeweiligen Änderung der Leistungsfähigkeit kompensiert. Eine verringerte Leistungsfähigkeit führt zu kürzeren Fahrtweiten bei längeren Fahrtzeiten und umgekehrt. In den Introductory-Szenarien bleibt der Verkehrszeitaufwand der Pkw-Modi so für weniger Wege und in Established- und Prevalent-Szenarien für mehr Wege ähnlich zum Anteil im Basisszenario. Dies ist in Übereinstimmung mit der Theorie des konstanten Reisezeitbudgets (FGSV (2005b), ZAHAVI (1979)), das in Kapitel 2.5 erwähnt wird.

Dasselbe gilt für das AV-ready Netz N2. Hier sind die modalen Verlagerungen im Verkehrsaufkommen größer, wodurch sich die etwas größeren Abweichungen des gesamten Verkehrszeitaufwands erklären. Für den Modus Pkw-Fahrer beträgt die Änderung des Zeitaufwands zwischen -0,1 % und +0,1 %. Für Prev (100) gleichen sich 0,8 % zusätzliche Wege und eine um 0,9 % geringere mittlere Fahrtzeit größtenteils gegenseitig aus, sodass der Verkehrszeitaufwand nur um 0,04 % sinkt.

Für das AV-ready Netz N3 treten in den Introductory-Szenarien keine Änderungen im Vergleich zu N2 auf. Established-Szenarien zeigen einen Anstieg des Zeitaufwands gesamt und für Pkw-Fahrer von bis zu 0,7 % für Esta (80), obgleich das Verkehrsaufkommen anteilig etwas geringer als im Basisszenario ausfällt. Die verringerte Leistungsfähigkeit auf der Straßenklasse S3 verursacht eine um bis zu 1,1 % längere mittlere Fahrtzeit. Für Prevalent-Szenarien ergeben sich für Pkw-Fahrer Reduktionen des Zeitaufwands, obwohl mehr Wege mit dem Pkw zurückgelegt werden und die mittlere Fahrtweite länger ist. Dies führt ebenfalls zu einer Verringerung des gesamten Verkehrszeitaufwands. Die Leistungsfähigkeit ist bei Advanced AV auf allen Straßenklassen höher und die mittlere Fahrtzeit sinkt von -0,9 % für Prev (60) bis -1,8 % für Prev (100) im Vergleich zum Basisszenario.

Sofern nur die Netze N1 oder N2 AV-ready sind, ist der Zeitaufwand des Modus Pkw-Fahrer relativ unverändert. Größere Abweichungen treten dann für N3 auf, dass die Straßenklasse S3 inkludiert. Die Effekte aus der Leistungsfähigkeit auf den Verkehrszeitaufwand korrelieren für N3 innerhalb der Szenariengruppen mit dem AV-Anteil. Ansonsten korreliert der AV-Anteil für alle Netzvarianten mit Änderungen der mittleren Fahrtzeit.

Die vollständige oder anteilige Kompensation von Fahrtzeiteinsparungen durch eine erhöhte Leistungsfähigkeit wie z. B. für Prevalent-Szenarien und dem Netz N3 durch längere Fahrtweiten und höhere Verkehrsaufkommen entspricht dem Rebound-Effekt.

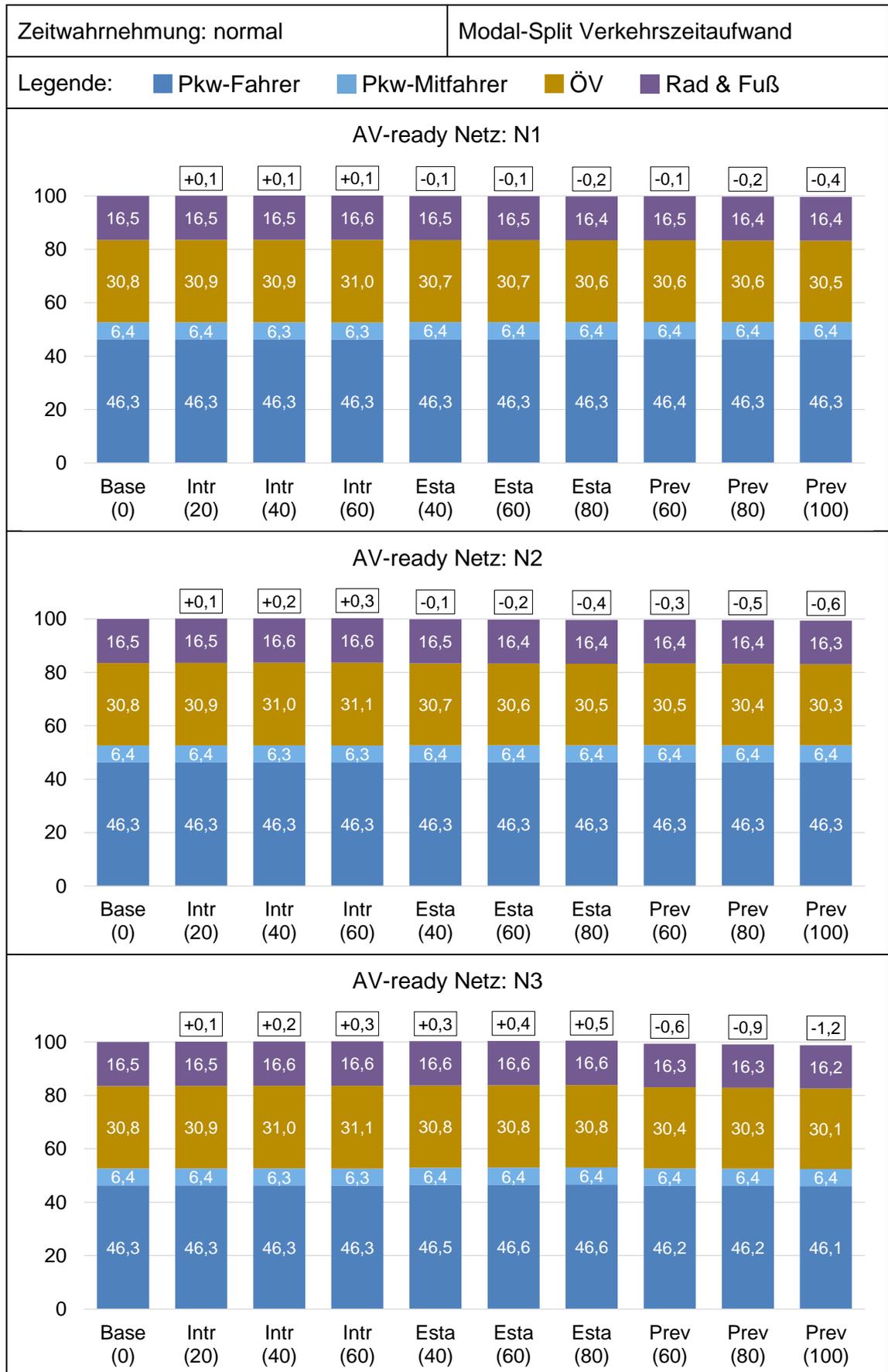


Abbildung 30: Modal-Split Verkehrszeitaufwand für normal, normiert auf Base $\hat{=}$ 100.

6.3.2 Szenarienreihen „red-15“

Die Ergebnisse für die Szenarienreihen red-15 beinhalten nun Einflüsse aus Leistungsfähigkeit und veränderter Zeitwahrnehmung.

Abbildung 31 zeigt den Modal-Split für das Verkehrsaufkommen und die Annahme, dass die automatisierte Fahrtzeit, die 10 min übersteigt, als 15 % kürzer empfunden wird. Für das Netz N1 ergeben sich praktisch kaum Unterschiede im Vergleich zu einer unangepassten Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit. Der Anteil für Pkw-Fahrer im Szenario Intr (20) scheint um 0,1 %p geringer zu sein, als für das Pendant im vorigen Kapitel. Tatsächlich beträgt der Unterschied 0,003 %p und durch Runden ergibt sich diese vermeintlich größere Abweichung. Nichtsdestotrotz fällt der geringere Anteil des Verkehrsaufkommens für Pkw-Fahrer auf, obwohl empfundene Fahrtzeitvorteile vorhanden sind. Die Auswertung der Fahrtzeitverteilung für dieses Szenario zeigt, dass weniger als 12 % aller AV-Wege überhaupt eine automatisierte Fahrtzeit, die länger als 10 min ist, aufweisen. Das entspricht nur knapp 2,4 % aller Pkw-Wege, die von einer veränderten Zeitwahrnehmung bezüglich Ziel- und Moduswahl profitieren. Zusätzlich erfahren alle AV-Nutzer innerhalb der Routenwahl einen empfundenen Zeitvorteil auf S1-Straßen, auf denen jedoch der höhere PE-Faktor von 1,2 für Fahrtzeitverlängerungen für alle Fahrzeuge sorgt. Aufgrund dieser gegensätzlichen Wirkungen ist eine Aussage über die erwarteten Anteile der Pkw-Modi in diesem Szenario nicht eindeutig zu treffen.

Für das Netz N2 und automatisiertem Fahren auf der Straßenklasse S2 beträgt der Anteil 21-22 % der AV-Wege, die empfundene Fahrtzeitvorteile für die Ziel- und Moduswahl erfahren. In der Folge gibt es für einzelne Szenarien geringe Zugewinne für den Modusanteil der Pkw-Fahrer im Vergleich zu denselben Szenarien mit unveränderter Zeitwahrnehmung.

Ist N3 die angenommene Netzvariante, sind es 52-53 % der AV-Wege, die automatisierte Fahrtzeiten aufweisen, die länger als 10 min sind. Für Introductory- und Established-Szenarien kommt es zu geringfügigen Änderungen zum Basisszenario und erneut einer leichten Steigerung der Pkw-Modusanteile im Vergleich zur Szenarienreihe normal. In Prevalent-Szenarien sind deutlichere Zugewinne um bis zu 2 % vorhanden, so dass für 100 % AV von 49 % der Personen der Modus Pkw-Fahrer gewählt wird.

In der Szenariengruppe Prevalent steigern sowohl die erhöhte Leistungsfähigkeit als auch die Zeitwahrnehmung durchweg die Attraktivität der Pkw-Modi durch eine erhöhte Angebotsqualität und Erreichbarkeit. Dafür wird auch der direkte Zusammenhang von AV-Anteil und modalen Verlagerungen klar erkennbar, was bei Introductory und Established für die Netze N3 und N1 nicht der Fall ist. Für das AV-ready Netz N2 reicht die verringerte Leistungsfähigkeit bei Introductory und die verbesserte Leistungsfähigkeit bei Established jeweils auf S1 und S2 aus, um einen Zusammenhang zum Modal-Split herzustellen. Innerhalb jeder Szenariengruppe verhalten sich AV-Anteil und Änderungen im Anteil des Modus Pkw-Fahrer für alle Netzvarianten proportional.



Abbildung 31: Modal-Split Verkehrsaufkommen für red-15.

Abbildung 32 zeigt die Verkehrsleistung für die Szenarienreihen red-15 mit den drei Varianten für das AV-ready Netz. Für das AV-ready Netz N1 ergeben sich geringe Reduktionen der Verkehrsleistung insgesamt und des Modus Pkw-Fahrer in den Szenarien der Gruppe Introductory. Bei einer Ausstattung der privaten Pkw-Flotte von 60 % Basic AV verliert der Modus 0,6 % seines Anteils der Fahrleistung im Vergleich zum Basisszenario. Für Established- und Prevalent-Szenarien steigt die Pkw-Fahrleistung. In Esta (80) beträgt die Steigerung knapp 3 % und für Prev (100) etwa 4 %.

Befahren AV auch Straßen der Klasse S2 automatisiert, werden die Abweichungen größer, bleiben aber direktional identisch zu denen mit dem Netz N1. Die größten Änderungen pro Szenariengruppe treten stets bei den größten AV-Anteile auf und betragen -0,8 % für Introductory, +4,4 % für Established und +6,3 % für Prevalent bezüglich der Pkw-Fahrleistung.

Empfundene Fahrtzeitvorteile wirken in Introductory-Szenarien gegensätzlich zu der reduzierten Leistungsfähigkeit der Basic AV. Für die Netze N1 und N2 dominiert der Einfluss aus der Leistungsfähigkeit. Für das AV-ready Netz N3 ändert sich das, weil die Vorteile der verkürzten empfundenen Fahrtzeit zum Tragen kommen und die Leistungsfähigkeit von Basic AV aus der Introductory-Gruppe auf S3 gleichzeitig identisch zu der von CV ist.

Für das AV-ready Netz N3 steigt die Verkehrsleistung nun für alle Szenarien gesamt und für Pkw-Fahrer an. Der maximale Anstieg für die Pkw-Fahrleistung beträgt für Intr (60) 1,4 %, für Esta (80) 4,9 % und für Prev (100) rund 11 %.

Das Niveau der Verkehrsleistung der Pkw-Modi und auch insgesamt steigt durchweg im Vergleich zu der Szenarienreihe mit unveränderter Zeitwahrnehmung, obwohl die modalen Verlagerungen im Verkehrsaufkommen sich für die Netze N1 und N2 nicht relevant geändert haben. Der Grund ist der Anstieg der mittleren Fahrtweite für Pkw-Wege, resultierend aus einer verbesserten Angebotsqualität und Erreichbarkeit aufgrund von empfundenen Fahrtzeitvorteilen und damit zusammenhängenden Änderungen in der Zielwahl. Einflüsse der Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit auf die Routenwahl werden mit der Szenariengruppe Original in Kapitel 6.4.1 analysiert.

Im Extremfall für Prev (100) und dem AV-ready Netz N3 steigt die mittlere Fahrtweite um knapp 9 % im Vergleich zu Base an, für N2 beträgt die Steigerung 5,3 % und für N1 3,6 %. In Esta (80) und Intr (60) steigt die mittlere Fahrtweite um 4,9 % bzw. 1,4 %. Für alle Szenarien gilt, dass die mittlere Fahrtweite in N3 größer ist als in N2.

Im Netz N3 wirkt die veränderte Zeitwahrnehmung am stärksten, da das AV-ready Netz mit der Straßenklasse S3 deutlich an Länge gewinnt und somit einerseits mehr AV-Fahrten und andererseits diese Fahrten zu einem höheren Ausmaß profitieren.

Mittlere Fahrtweite und Verkehrsleistung korrelieren mit dem AV-Anteil, verändern sich aber innerhalb jeder Szenariengruppe überproportional zu diesem.

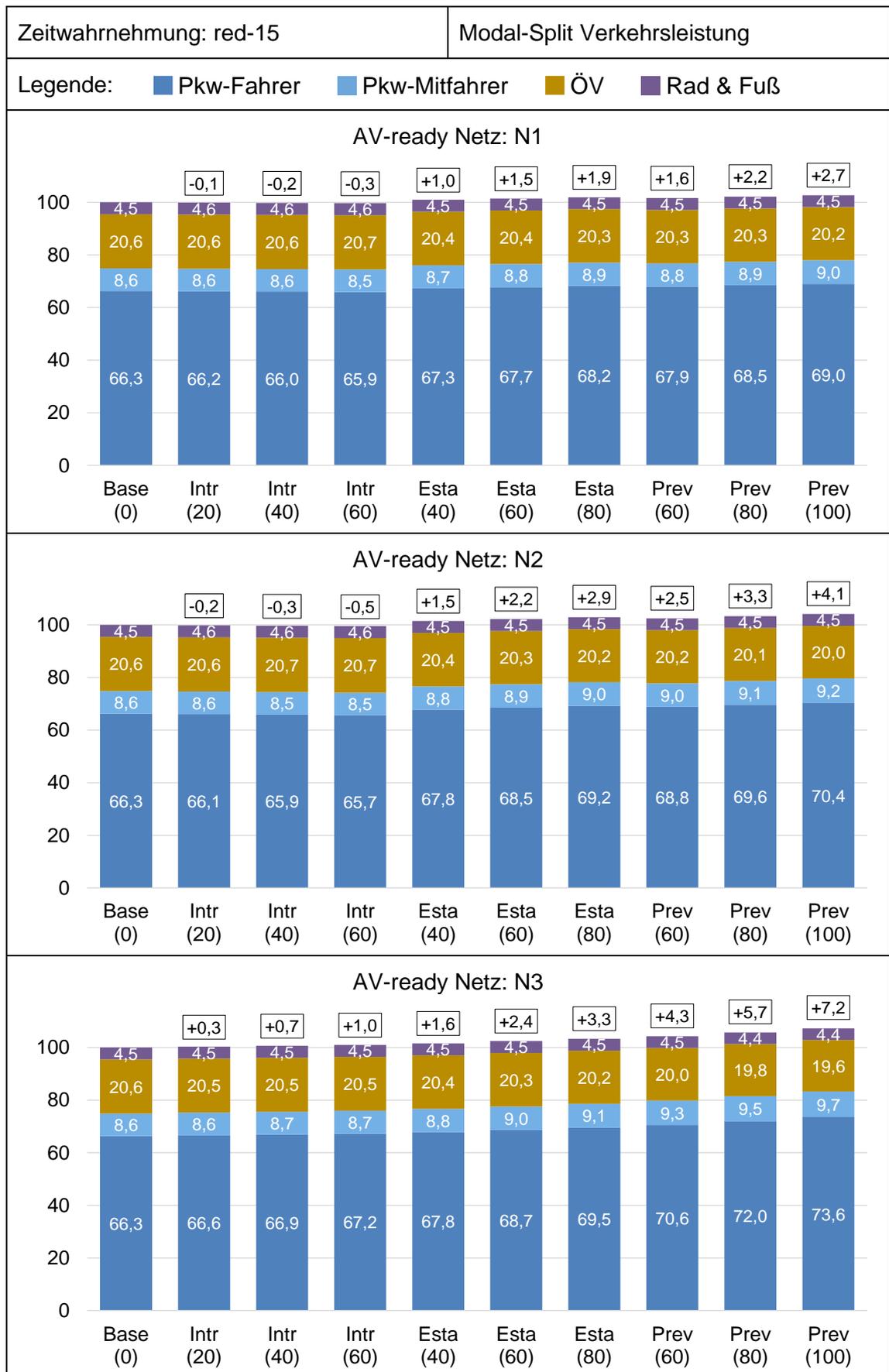


Abbildung 32: Modal-Split Verkehrsleistung für red-15, normiert auf Base \triangleq 100.

Abbildung 33 zeigt die Anteile der Modi am Verkehrszeitaufwand für die Szenarienreihen red-15 mit den drei Varianten für das AV-ready Netz. Für das Netz N1 sind die Abweichungen des gesamten Zeitaufwands und dem des Modus Pkw-Fahrer gering. Für alle Szenarien steigt der Verkehrszeitaufwand für Pkw-Fahrer mit dem Höchstwert von +0,6 % an. Insgesamt nimmt der Zeitaufwand nur für Szenarien der Prevalent-Gruppe ab. im Vergleich zu einer unveränderten Zeitwahrnehmung führt der deutlichere Anstieg der mittleren Fahrtweite nun auch für Established-Szenarien zu einer Erhöhung der mittleren Fahrtzeit von 0,2-0,3 %.

Für das Netz N2 ist wie auch bei N1 ist Verkaufskommen in Introductory leicht rückläufig, aber längere mittlere Fahrtzeiten führen zu steigenden Zeitaufwänden für Pkw-Fahrer. Während für eine unveränderte Zeitwahrnehmung der Aufwand für Pkw-Fahrer über die Szenarienreihe bei N2 nahezu konstant war, steigt dieser nun an. Obwohl für Established- und Prevalent-Szenarien die Anteile des Zeitaufwands für Pkw-Fahrer mit bis zu +1,6 % bzw. +1,9 % im Vergleich zu Introductory mit bis +1,2 % stärker steigen, ist aufgrund der modalen Verlagerungen im Verkehrsaufkommen der Anstieg des gesamten Verkehrszeitaufwands geringer.

Die Zuwächse der mittleren Fahrtweite für Established und Prevalent werden teilweise durch die erhöhte Leistungsfähigkeit für Intermediate und Advanced AV auf Straßenklasse S1 und S2 ausgeglichen, sodass die Erhöhung der mittleren Fahrtzeit zwischen Esta (40) und Prev (100) um den Faktor 3,3 bis 5,4 geringer ausfällt.

Mit dem AV-ready Netz N3 steigt der gesamte und Pkw-Fahrer-spezifische Verkehrsaufwand für alle Szenarien am stärksten. Die maximale Erhöhung des Zeitaufwands für Pkw-Fahrer beträgt für Introductory rund 4 %, für Established 6,3 % und für Prevalent 5,8 %. Bei gleichen AV-Anteilen übertrifft die Steigerung der Established-Szenarien die von Prevalent-Szenarien. Die Anteile des Verkehrszeitaufwands für Esta (80) sind auch höher als für Prev (100). Die geringere Leistungsfähigkeit der Intermediate AV auf S3-Straßen in Established-Szenarien führt zu einem deutlichen Anstieg der Fahrtzeiten, sodass diese sogar stärker ansteigen als die mittlere Fahrtweite. Das gilt auch für Introductory-Szenarien, in denen die mittlere Fahrtzeit dreimal so stark ansteigt, wie die mittlere Fahrtweite. In Prevalent-Szenarien können die leistungsfähigen Advanced AV dies noch ausgleichen und die mittlere Fahrtzeit steigt um weniger als die Hälfte im Vergleich zur mittleren Fahrtweite.

Die empfundene Fahrtzeitvorteile verursachen die Wahl weiter entfernter Ziele, was zu größeren Fahrtweiten führt. Es liegt nahe, dass die Fahrtzeiten im Mittel ebenfalls ansteigen, denn für höhere Verkehrsaufkommen wäre das auch schon selbst ohne längere Fahrtweiten zu erwarten. Eine erhöhte Leistungsfähigkeit der Fahrzeugflotte kann dies teilweise kompensieren, sodass die tatsächlichen Fahrtzeiten zu geringerem Ausmaß steigen. Sollte die Leistungsfähigkeit auf großen Teilen des Netzes wie auf S3 (Established) oder gleichzeitig auf S1 und S2 (Introductory) niedriger sein, steigen Fahrtzeiten stärker wie Fahrtweiten und je nach AV-Anteil macht sich dies auch am Verkehrszeitaufwand für Pkw-Fahrer und insgesamt bemerkbar.

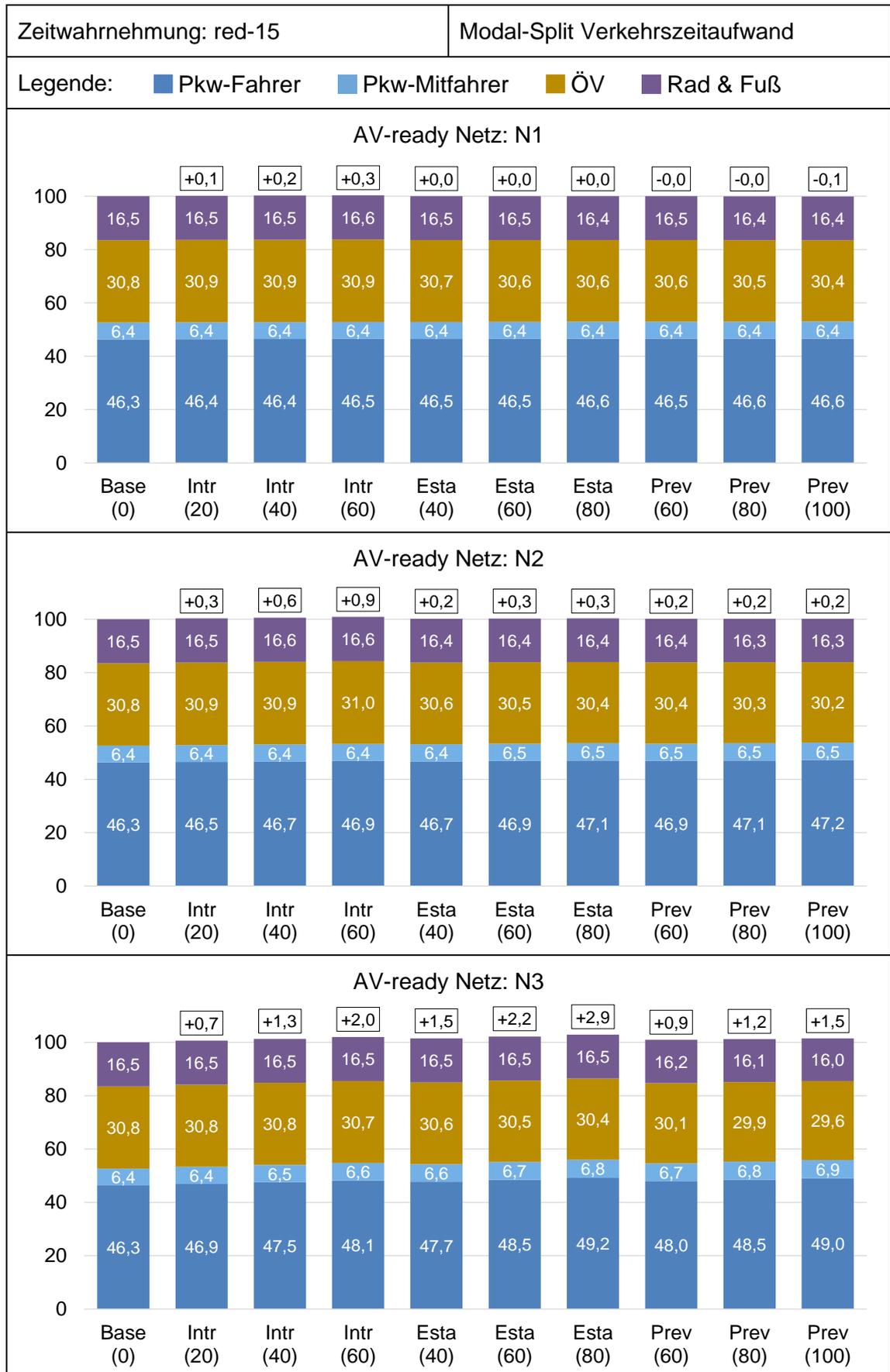


Abbildung 33: Modal-Split Verkehrszeitaufwand für red-15, normiert auf Base $\hat{=}$ 100.

6.3.3 Szenarienreihen „red-30“

Die Ergebnisse für die Szenarienreihen red-30 beinhalten ebenfalls Einflüsse aus Leistungsfähigkeit und veränderter Zeitwahrnehmung, wobei die automatisierte Fahrtzeit, die die 10 min übersteigt, nun für die Nachfrageberechnung um 30 % reduziert wird.

Abbildung 34 zeigt den Modal-Split des Verkehrsaufkommens für die drei AV-ready Netzvarianten. Für N1 zeigt sich eine weitgehend unveränderte Aufteilung der Wege auf die Modi im Vergleich zur entsprechenden Szenarienreihe red-15. Nur ungefähr 13 % der Wege mit AV können von einer veränderten Zeitwahrnehmung profitieren. Von diesen liegt der Großteil der Fahrten im Bereich von 10 bis 15 min, sodass letztlich die Attraktivität der Pkw-Modi nicht relevant zunimmt.

Für das Netz N2 ergeben sich für Introductory-Szenarien kaum Änderungen im Vergleich zu red-15. Die auf den automatisiert befahrbaren Straßenklassen geringere Leistungsfähigkeit von AV sorgt dafür, dass in kleinem Ausmaß Personen von den Pkw-Modi zu Rad, Fuß und ÖV wechseln. Empfundene Fahrtzeitvorteile sind für 24-25 % der Wege mit AV möglich, können den Einfluss aus der Leistungsfähigkeit jedoch nicht übertreffen. In den anderen Szenarien legen die Anteile der Wege für Pkw-Fahrer um bis zu 0,7 % für die Established- und 1,0 % für die Prevalent-Gruppe zu.

Ist das Netz N3 automatisiert befahrbar, gewinnt der Modus Pkw-Fahrer für jeweils 20 % AV stets 0,1 %p im Anteil des Verkehrsaufkommens hinzu. Für Intr (60) entspricht das einem Anstieg der Pkw-Fahrten von 0,6 %. Nun, da je nach Szenario zwischen 53 % und 55 % aller Fahrten mit AV eine automatisierte Fahrtzeit von über 10 min aufweisen, dominiert der Einfluss aus der veränderten Zeitwahrnehmung die Effekte aus der Leistungsfähigkeit, die die Attraktivität des Modus bisher verringert haben.

In den Established-Szenarien steigt der Anteil für Pkw-Fahrer ebenso und der Zuwachs ist für Esta (80) mit +1,0 % am größten. Der Vergleich mit red-15 zeigt einen um 0,2-0,3 %p höheres Pkw-Verkehrsaufkommen, was durch die um 15 % größere Reduktion der empfundenen automatisierten Fahrtzeit begründet ist. Für Szenarien der Gruppe Prevalent ist der Anteil für Pkw-Fahrer am größten und steigt im Vergleich zu Base um maximal 3 % für 100 % Advanced AV an. Im Vergleich zu red-15 sind das 0,4 %p mehr und somit 49,4 % aller Wege, die Pkw-Fahrer zurücklegen.

In den Szenarienreihen red-30 ist der Anteil an Wegen, die von empfundenen Fahrtzeitvorteilen profitieren können, für jede Netzvariante größer als bei red-15. Die Ursache liegt zum einen in generell längeren Fahrtzeiten und zum anderen darin, dass Pkw-Fahrer ihre Routenwahl anpassen.

Innerhalb jeder Szenariengruppe verhalten sich die Änderungen im Anteil der Pkw-Fahrer im Vergleich zum Basisszenario proportional zum AV-Anteil.

Je mehr Straßen das AV-ready Netz einschließt, umso größer ist die Wirkung der empfundenen Fahrtzeitvorteile auf die Attraktivität der Nutzung von Pkw.



Abbildung 34: Modal-Split Verkehrsaufkommen für red-30.

Abbildung 35 zeigt den distanzbasierten Modal-Split für die Szenarienreihe red-30 und drei AV-ready Netzvarianten. Für das Netz N1 steigt die gesamte Verkehrsleistung nun für alle Szenarien an, wobei der Anstieg in der Introductory-Gruppe noch gering ausfällt. Der Anteil für Pkw-Fahrer verläuft von nahezu unverändert in Intr (20) bis zu +0,2 % in Intr (60). Die Pkw-Fahrleistung bleibt gleich bzw. erhöht sich trotz eines geringeren Wegeanteils als in Base wegen des Anstiegs der Fahrtweiten von durchschnittlich bis +0,4 %.

Für die Gruppen Established und Prevalent verstärkt sich die Entwicklung, die bereits in red-15 beobachtet wurde, dass die Pkw-Fahrleistung und die Verkehrsleistung insgesamt die Werte aus dem Basisszenario übertreffen und mit dem AV-Anteil steigen. Die höchsten Zuwächse für die Pkw-Fahrleistung pro Szenariengruppe treten mit +4,2 % für Esta (80) und +5,6 % für Prev (100) auf. Diese werden hauptsächlich durch längere Fahrtweiten (+3,8 % für Esta (80) und +5,1 % für Prev (100)) verursacht, die aus einer veränderten Zielwahl resultieren.

Mit dem AV-ready Netz N2 fallen die Ergebnisse tendenziell gleich aus wie für das Netz N1. Für Introductory-Szenarien steigt die Fahrtweite um knapp 1 % und der Anteil der Pkw-Fahrleistung um bis zu 0,5 %. In der Established-Gruppe steigt die mittlere Fahrtweite um knapp 6 %, was zusammen mit den Verlagerungen bezüglich der Wege zu einem Anstieg von bis zu 6,6 % für die Verkehrsleistung der Pkw-Fahrer führt. In den Prevalent-Szenarien steigt die Fahrtweite durchschnittlich um knappe 8 % und die Fahrleistung um 9 %.

Kommt die Straßenklasse S3 als automatisiert befahrbar im Netz N3 hinzu, fallen die Ergebnisse noch extremer aus. In allen Szenarien ist das Pkw-Verkehrsaufkommen höher als in Base und die mittleren Fahrtweiten steigen für Introductory um 1-4 %, für Established um 4-9 % und für Prevalent um 8-14 %. Das führt zu höheren Verkehrsleistungen in den drei Gruppen von bis zu 5 %, 10 % und 18 % für Introductory, Established bzw. Prevalent.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine noch stärkere Berücksichtigung von empfundenen Fahrtzeitvorteilen mit AV nicht nur die Nutzung von Pkw an sich, sondern auch das Zurücklegen weiterer Distanzen damit attraktiver werden. Die bessere Erreichbarkeit weiter entfernter Ziele wirkt sich auf die Zielwahl und damit auf die mittlere Fahrtweite aus. Da die Änderung der mittleren Fahrtweite der Pkw-Fahrer innerhalb der Szenariengruppen überproportional zum AV-Anteil ist, steigt auch die Fahrleistung entsprechend an.

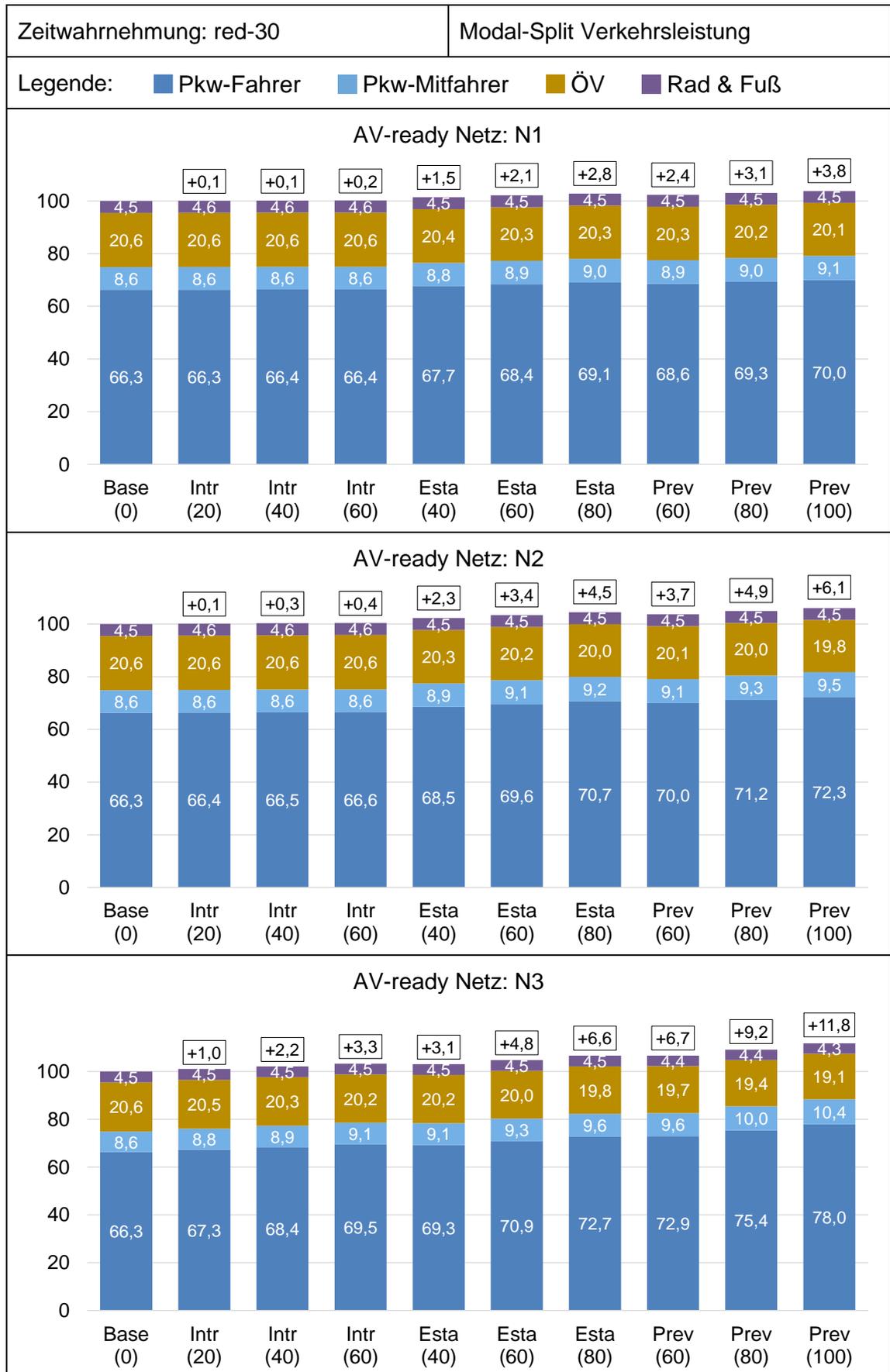


Abbildung 35: Modal-Split Verkehrsleistung für red-30, normiert auf Base \triangleq 100.

Abbildung 36 zeigt den Verkehrszeitaufwand für die Szenarienreihen red-30 und die drei AV-ready Netzvarianten. Für das Netz N1 steigt der Zeitaufwand für Pkw-Fahrer als auch insgesamt für alle Szenarien an. Der Anstieg der Personenstunden der Pkw-Fahrer beträgt für Introductory bis zu 1,2 %, für Established bis zu 1,5 % und für Prevalent bis zu 1,8 %. Die Änderung des Verkehrszeitaufwands für die Introductory-Gruppe gegenüber dem Basisszenario ist im Vergleich zur Änderung der Pkw-Fahrleistung damit größer. Die mittlere Fahrtzeit steigt ungefähr dreimal so stark wie die mittlere Fahrtweite. Für die anderen beiden Szenario-Gruppen verhält es sich umgekehrt: die Verkehrsleistung steigt deutlicher als der Verkehrszeitaufwand. Im Vergleich zur entsprechenden Szenarienreihe red-15 steigt der gesamte und Pkw-spezifische Verkehrszeitaufwand an, da sich die mittleren Fahrtweiten weiter erhöht haben. Auch wenn die Fahrtweite um den Faktor 3-4 stärker ansteigt als die Fahrtzeit, erhöht sich die Fahrtzeit dennoch.

Im Falle des AV-ready Netzes N2 zeigen sich tendenziell dieselben Wirkungen wie in der Szenarienreihe red-15 mit größeren Abweichungen im Vergleich zum Basisszenario. Der Anstieg des Pkw-Zeitaufwands korreliert mit dem AV-Anteil und beträgt für Introductory bis +3,2 %, für Established bis +4,2 % und für Prevalent bis +5,1 %. Die Fahrtzeit in ersterer Gruppe steigt ungefähr viermal so stark wie die Fahrtweite. In Established- und Prevalent-Szenarien kann die erhöhte Leistungsfähigkeit auf S1- und S2-Straßen dieses Verhältnis umdrehen, sodass die mittlere Fahrtzeit nur um den Faktor 0,5 bis 0,6 im Verhältnis zur mittleren Fahrtweite ansteigt.

Für das Netz N3 ergeben sich für alle Szenarien Steigerungen der Verkehrszeitaufwands insgesamt, ausgelöst durch Steigerungen des Zeitaufwands der Pkw-Modi. Diese wiederum kommen neben modalen Verlagerungen bezüglich der Wege hauptsächlich durch höhere mittlere Fahrtzeiten zustande. Innerhalb der Szenariengruppen ist der Anstieg der mittleren Fahrtzeit und damit auch der Verkehrszeitaufwand überproportional zum AV-Anteil. Für Intr (60) sind diese um 8 %, für Esta (80) um knapp 12 % und für Prev (100) um 10 % länger. Die Zuwächse des Pkw-Zeitaufwands belaufen sich für dieselben Szenarien auf +8,5 %, +12,7 % und +13,6 %. In den Introductory-Szenarien steigt die mittlere Fahrtzeit ungefähr doppelt so stark wie die mittlere Fahrtweite. Durch die geringere Leistungsfähigkeit der Intermediate AV auf den Straßen der Klasse S3 in Established-Szenarien steigt die Fahrtzeit nun auch stärker als die Fahrtweite: das Verhältnis beträgt 1,3. Dieses Verhältnis entspricht für Prevalent-Szenarien 0,7 und zeigt, dass die erhöhte Leistungsfähigkeit auf allen drei automatisiert befahrbaren Straßenklassen das erhöhte Verkehrsaufkommen durch mehr Pkw-Wege und längere Fahrtweiten teils kompensieren kann.

Die bereits beobachteten Trends in den Ergebnissen sind in der Szenarienreihe für das Netz N3 am ausgeprägtesten. Mit der angenommenen Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit verstärkt sich zum einen die Attraktivität der Pkw-Modi und zum anderen die Bereitschaft, weiter entfernte Ziele aufzusuchen. Dies erhöht die mittlere Fahrtzeit und damit den Verkehrszeitaufwand. Die erhöhten Zeitaufwände werden jedoch von den Pkw-Reisenden nach den zugrundeliegenden Annahmen nicht in diesem Maße wahrgenommen.

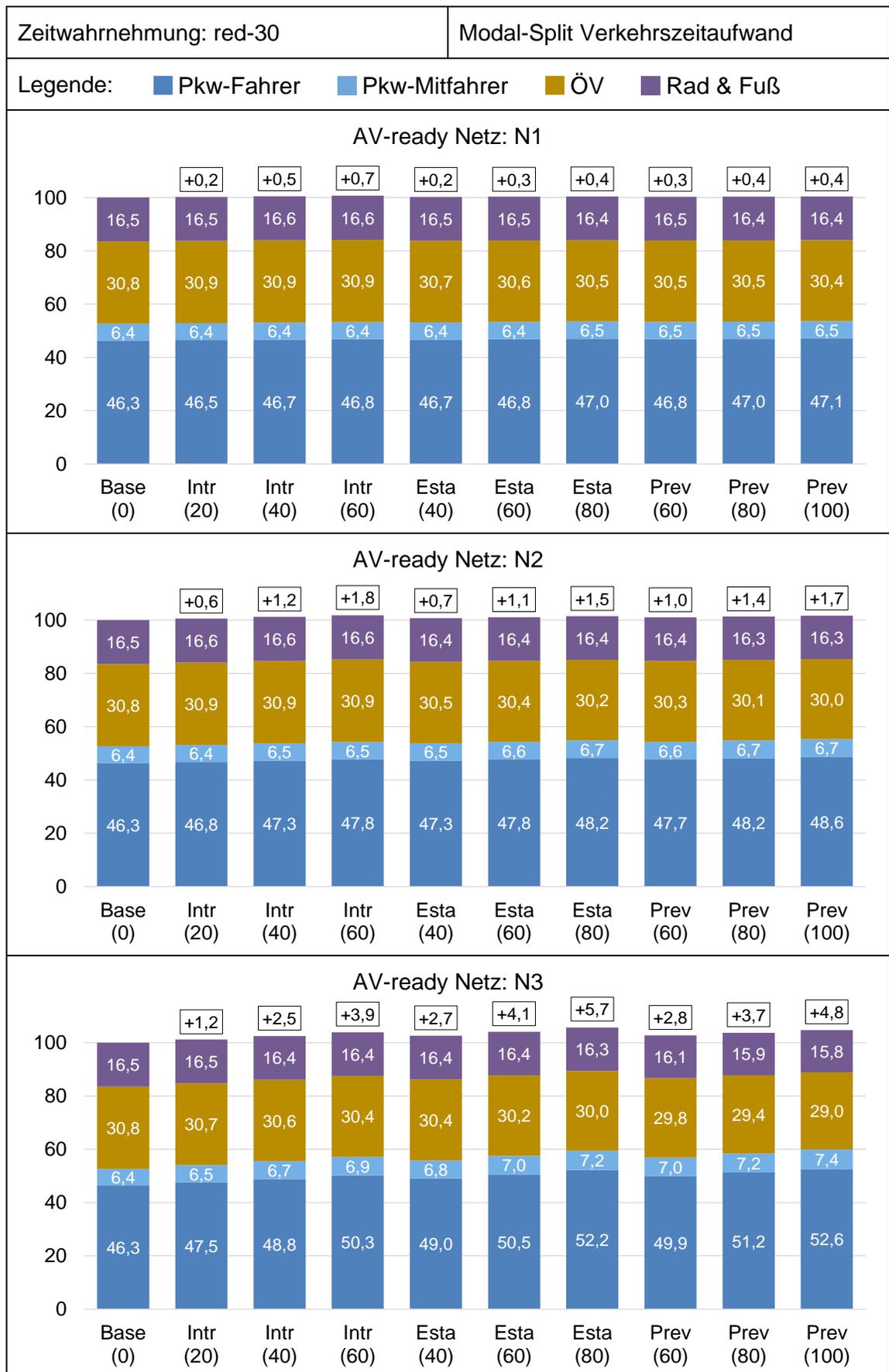


Abbildung 36: Modal-Split Verkehrszeitaufwand für red-30, normiert auf Base $\hat{=}$ 100.

6.3.4 Prevalent-Extreme

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zu den Prevalent-Extreme-Szenarien vorgestellt, bei denen das Netz N4 AV-ready ist. Das bedeutet, dass alle Straßen automatisiert befahrbar sind. Die Annahme, dass AV nicht vollautomatisiert sind, bleibt dennoch bestehen. Um die Unterschiede zu identifizieren, die sich daraus ergeben, dass die Straßenklasse S4, die Straßen des untergeordneten Netzes repräsentiert, nun auch AV-ready ist, wird ein Vergleich zu Prevalent-Szenarien mit dem AV-ready Netz N3 gezogen. Die konkreten Annahmen zu den PE-Faktoren werden in Tabelle 17 wiederholt. Advanced AV fahren in der Szenariengruppe Prevalent-Extreme auf S4-Straßen wie auch auf S3-Straßen mit einer verbesserten Leistungsfähigkeit.

Straßenklasse	Prevalent	Prevalent-Extreme
	Advanced AV auf Netz N3	Advanced AV (modifiziert) auf Netz N4
S1	0,73	0,73
S2	0,76	0,76
S3	0,85	0,85
S4	(n. a.) 1,00	0,85

Tabelle 17: PE-Faktoren für AV pro Straßenklasse (n. a. für nicht automatisiert).

Abbildung 37 zeigt den Modal-Split des Verkehrsaufkommens, der Verkehrsleistung und des Verkehrszeitaufwands für alle berechneten Prevalent-Extreme-Szenarien neben dem Basisszenario. Verkehrsleistung und -zeitaufwand werden erneut zum Basisszenario normiert und mit den Änderungen der Summe im Vergleich dazu dargestellt. Die Szenarienreihe beinhaltet jeweils drei Szenarien von 60 % bis 100 % AV-Anteil für die drei bekannten Annahmen zur Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit.

Im Vergleich zu Prevalent-Szenarien und Netz N3 steigt das Verkehrsaufkommen für normal und red-15 um bis zu 0,1 %p und für red-30 um bis zu 0,3 %p, was bei jeweils 100 % AV relativen Änderungen für die drei Varianten der Zeitwahrnehmung von +1,3 %, +2,3 % und +3,5 % im Vergleich zu Base entspricht. Anteile für Pkw-Fahrer am Verkehrsaufkommen sind für jede Annahme der Zeitwahrnehmung proportional zum AV-Anteil.

Bei red-15 weisen knapp 58 % aller Wege mit AV eine automatisierte Fahrtzeit auf, die 10 min übersteigt. Bei red-30 können mit einem Anteil von ungefähr 60 % der Fahrten mit AV mehr Wege von empfundenen Fahrtzeitvorteilen profitieren. Da alle Straßen AV-ready sind, ist dies nicht einer angepassten Routenwahl zuzuschreiben, sondern liegt an längeren Fahrtzeiten, sodass mehr Wege mit AV überhaupt die Fahrtzeit von 10 min überschreiten.

Die verbesserte Leistungsfähigkeit auf S4 erhöht die Angebotsqualität für die Pkw-Nutzung und macht Pkw-Modi damit attraktiver. Die Wirkung verstärkt sich mit empfundenen Vorteilen aus der Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit. Die erhöhte Attraktivität führt dazu, dass 2 % der Personen von den aktiven Modi und vom ÖV zu Pkw-Modi wechseln.

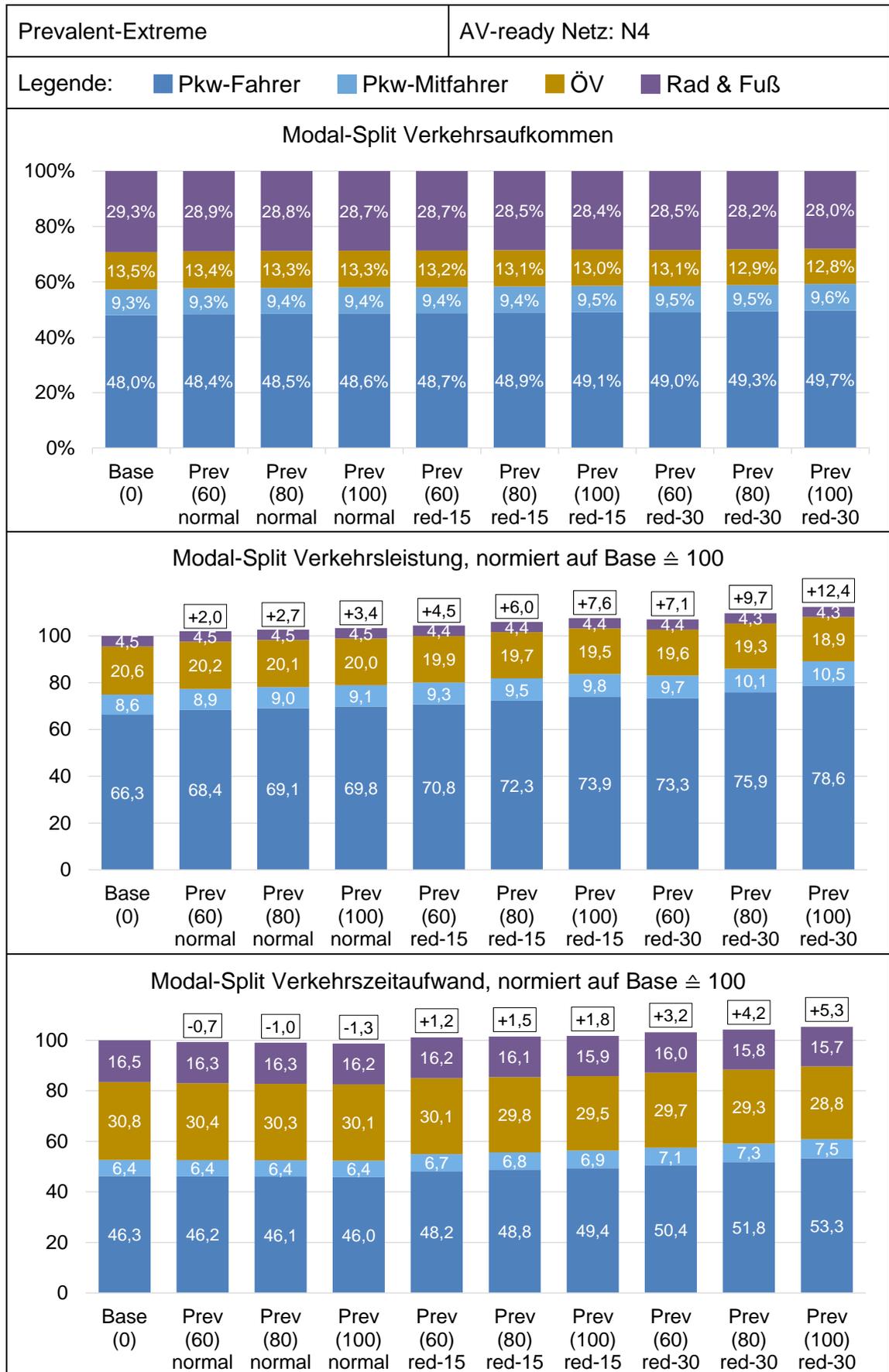


Abbildung 37: Szenarienreihe Prevalent-Extreme mit AV-ready Netz N4.

Die Verkehrsleistung insgesamt und für Pkw steigt im Vergleich zum Netz N3 für alle Prevalent-Extreme-Szenarien durchweg an. Für normal beträgt der Unterschied bis zu 0,1 %p, was aus dem erhöhten Verkehrsaufkommen resultiert. Die mittlere Fahrtweite wächst in gleichem Maße wie für das Netz N3. Mit der Zeitwahrnehmung nach red-15 steigt die Pkw-Fahrleistung um bis zu weitere 0,4 %p im Vergleich zu N3 an. Nun steigen auch die Fahrtweiten stärker, z. B. für 100 % AV um knapp 9 %. Für red-30 ergibt sich mit einer mittleren Fahrtweite, die für eine Vollausstattung der privaten Fahrzeugflotte mit AV um 14,6 % wächst, eine im Vergleich zu Base um 18,6 % erhöhte Pkw-Fahrleistung. Das entspricht einer Steigerung zu N3 um 1,0 %p. Die mittlere Fahrtweite steigt überproportional zum AV-Anteil an.

Mit dem alleinigen Einfluss der verbesserten Leistungsfähigkeit auf der Straßenklasse S4 sinkt die mittlere Fahrtzeit um bis zu 2,0 % und der Verkehrszeitaufwand für Pkw-Fahrer um 0,7 % für 100 % AV im Vergleich zum Basisszenario. Die Leistungsfähigkeit der AV-Flotte kann die erhöhte Verkehrsleistung damit kompensieren und zusätzlich Fahrtzeiten reduzieren.

Für eine 10 min überschreitende und um 15 % reduzierte automatisierte Fahrtzeit steigt die mittlere Fahrtzeit um bis zu 4,2 % an, was zusammen mit den Verlagerungen der Wege in einem erhöhten Pkw-Zeitaufwand von 6,7 % im Vergleich zum Basisszenario resultiert. Mit der 30-prozentigen Reduktion der empfundenen Fahrtzeit steigt die mittlere Fahrtzeit um bis zu 11,3 % und der Verkehrszeitaufwand für Pkw-Fahrer um 15,2 %. Die Unterschiede letzterer Größe im Vergleich zu N3 betragen bei 100 % AV für normal -0,2 %p, für red-15 +0,9 %p und für red-30 +1,6 %p.

Auch mit Effekten aus der Zeitwahrnehmung führt die erhöhte Leistungsfähigkeit von AV dazu, dass der Verkehrszeitaufwand weniger stark zunimmt als die Verkehrsleistung. Für red-15 wächst der Zeitaufwand halb so stark wie die Verkehrsleistung, für die Szenarien mit red-30 beträgt das Verhältnis schon 0,8. Je stärker der Einfluss aus der Zeitwahrnehmung ist, desto mehr gleichen sich die Wachstumsraten von mittlerer Fahrtweite und Fahrtzeit an.

Tabelle 18 bietet eine Übersicht zu den Änderungen der drei diskutierten Kenngrößen zu Base für den Modus Pkw-Fahrer der Prevalent-Szenarien mit dem AV-ready Netz N3 und den Prevalent-Extreme-Szenarien mit dem Netz N4. Die Trends der Ergebnisse zum Netz N3 werden verstärkt. Die größten Unterschiede treten bei red-30 auf.

Abbildung 38 zeigt die Fahrzeugbelastung des Szenarios mit 100 % AV und Zeitwahrnehmung red-30 der Gruppe Prevalent-Extreme und den Unterschied zum Basisszenario als relative Abweichung. Die höchsten Belastungen treten auf den Autobahnabschnitten von A8 und A81 auf, die die Region Stuttgart in West-Ost- bzw. Nord-Süd-Richtung kreuzen und an der Stadt Stuttgart südlich bzw. westlich vorbeiführen. Die Änderung der Verkehrsstärke für diese Straßen liegt weitestgehend im Bereich von +5 % bis +15 % zu Base. Hohe Belastungen treten außerdem auf den Bundesstraßen auf, die radial zur Stadt verlaufen. Dort sind die Abweichungen zu den Belastungen im Basisszenario häufig größer als +20 %. Tendenziell steigt der relative Zuwachs der Belastung, je näher die

Straße zur Stadt Stuttgart liegt. Für die Bereiche, die am Rand der Region liegen, geht der Anteil der berechneten Nachfrage zurück und der externe Verkehr dominiert. Da dieser konstant bleibt, ist die Abweichung der Belastungen zum Basisszenario entsprechend kleiner.

Zeit- wahr- neh- mung	AV- ready Netz ↓	Kenn- größe AV- Anteil	Verkehrsaufkommen			Verkehrsleistung			Verkehrszeitaufwand		
			60 %	80 %	100 %	60 %	80 %	100 %	60 %	80 %	100 %
normal	N3		+0,8 %	+1,0 %	+1,3 %	+3,1 %	+4,2 %	+5,2 %	-0,2 %	-0,3 %	-0,5 %
normal	N4		+0,8 %	+1,1 %	+1,4 %	+3,2 %	+4,2 %	+5,3 %	-0,3 %	-0,4 %	-0,7 %
red-15	N3		+1,3 %	+1,7 %	+2,1 %	+6,4 %	+8,7 %	+11,0 %	+3,6 %	+4,7 %	+5,8 %
red-15	N4		+1,4 %	+1,9 %	+2,3 %	+6,7 %	+9,1 %	+11,5 %	+4,1 %	+5,4 %	+6,7 %
red-30	N3		+1,8 %	+2,4 %	+3,0 %	+10,0 %	+13,7 %	+17,6 %	+7,9 %	+10,7 %	+13,6 %
red-30	N4		+2,1 %	+2,8 %	+3,4 %	+10,6 %	+14,5 %	+18,6 %	+8,9 %	+12,0 %	+15,2 %

Tabelle 18: Änderungen dreier Kenngrößen des Modus Pkw-Fahrer in Prevalent-Szenarien mit Netz N3 und N4 im Vergleich zum Basisszenario aus der Matrixauswertung.

Aufgrund der skalierten Darstellung für die Fahrzeugbelastungen sind die Auswirkungen auf das untergeordnete Straßennetz nicht zu erkennen. Tabelle 19 zeigt daher die Änderung der Verkehrsleistung für Pkw-Fahrer aus der Netzauswertung für dieselben Szenarien in der Region Stuttgart und auf der Straßenklasse S4. Bei den Werten für die Region treten teilweise minimale Abweichungen zu den Werten aus der Matrixauswertung auf, was an den grundsätzlichen Unterschieden der Auswertungen liegt: Die Matrixauswertung berücksichtigt auch den Zellbinnenverkehr, der jedoch nicht umgelegt wird und deshalb nicht in der Netzauswertung enthalten ist. Ferner unterscheidet die Matrixauswertung nicht danach, ob die gesamte Route in der Region verläuft oder nicht. Für Start und Ziel in der Region wird die Information der gesamten Route gewichtet mit der Belastung für die Auswertung herangezogen.

Bei der Betrachtung der Änderungen der Pkw-Fahrleistung auf S4-Straßen zeigt sich, welche Wirkung die Möglichkeit, auf diesen Straßen automatisiert fahren zu können, hat. Für fast alle N3-Szenarien nimmt die Verkehrsleistung auf dieser Straßenklasse ab. Für das AV-ready Netz N4 ist das Gegenteil der Fall. Für das Szenario mit 100 % AV und red-30 ist der Unterschied mit einer Differenz von 18,7 %p zwischen N3 und N4 maximal. Da die Verkehrsleistung auf S4 im Basisszenario nur ca. 3 % der gesamten Verkehrsleistung auf allen Straßenklassen im Netz ausmacht, wirkt sich diese Steigerung mit 0,33 % zusätzlichen Fahrzeugkilometern Vergleich zu Base aus. Auch der alleinige Einfluss der Leistungsfähigkeit für die Zeitwahrnehmung normal macht sich in der Verkehrsleistung auf Straßenklasse S4 bemerkbar, die im Vergleich von N3 zu N4 um 0,3-0,6 %p zunimmt.

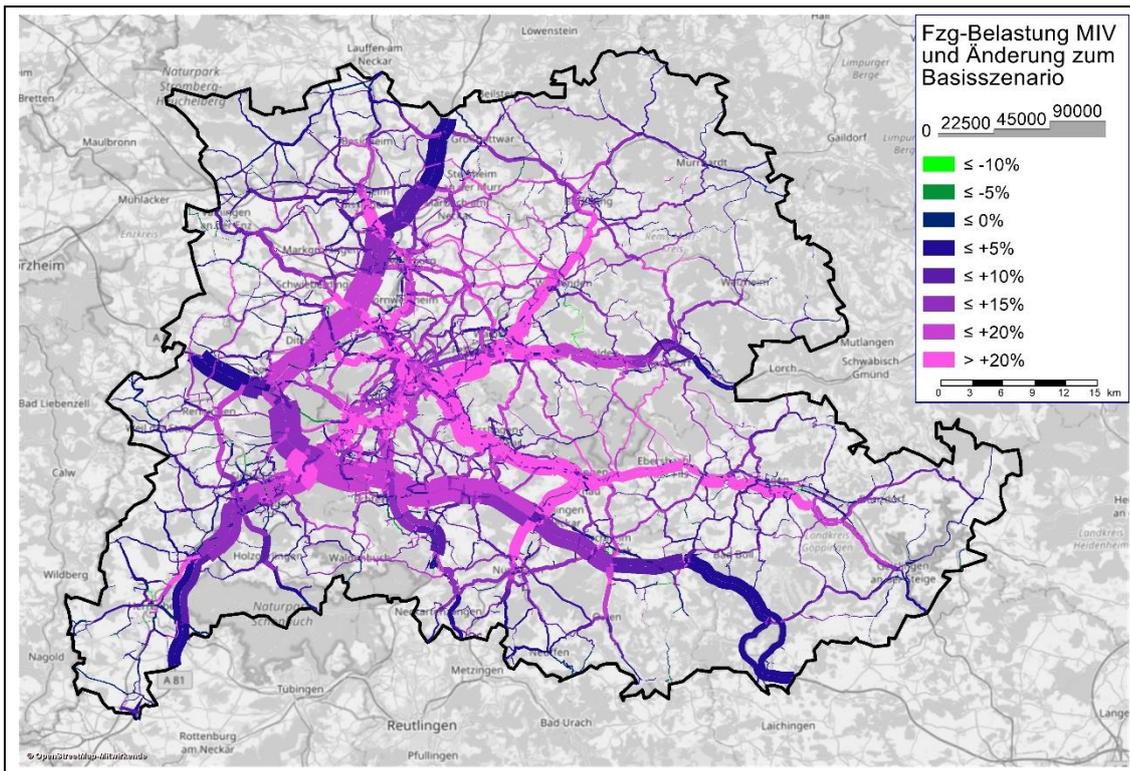


Abbildung 38: Fahrzeugbelastung und Änderung zu Base im Netz der Region Stuttgart für Prevalent-Extreme mit 100 % AV, red-30 (Hintergrundkarte: © OpenStreetMap-Mitwirkende, www.openstreetmap.org/copyright).

Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz ↓	Kenngröße AV-Anteil	Verkehrsleistung in der Region Stuttgart			Verkehrsleistung auf Straßenklasse S4		
			60 %	80 %	100 %	60 %	80 %	100 %
normal	N3		+3,2 %	+4,3 %	+5,3 %	+0,1 %	-0,3 %	-0,9 %
normal	N4		+3,2 %	+4,3 %	+5,4 %	+0,4 %	+0,1 %	-0,3 %
red-15	N3		+6,5 %	+8,8 %	+11,1 %	-2,8 %	-4,0 %	-5,4 %
red-15	N4		+6,8 %	+9,2 %	+11,6 %	+4,7 %	+5,9 %	+7,1 %
red-30	N3		+10,1 %	+13,8 %	+17,7 %	-3,9 %	-5,6 %	-7,7 %
red-30	N4		+10,7 %	+14,6 %	+18,7 %	+7,3 %	+9,2 %	+11,0 %

Tabelle 19: Änderungen der Verkehrsleistung des Modus Pkw-Fahrer im gesamten Netz und auf Straßenklasse S4 in der Region Stuttgart in Prevalent-Szenarien im Vergleich zu Base aus der Netzauswertung.

6.4 Szenariengruppe „Original“

Szenarienreihen, die Szenarien der Gruppe Original gemeinsam mit dem Basisszenario beinhalten, berücksichtigen nur den Einfluss aus einer veränderten Zeitwahrnehmung auf die Verkehrsnachfrage. Die Leistungsfähigkeit von AV ist damit stets identisch zu der von CV.

In dem folgenden Unterkapitel wird gemäß den bekannten Annahmen zu red-15 und red-30 die Zeitwahrnehmung variiert. Ergebnisse zu den drei Kenngrößen Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistung und Verkehrszeitaufwand werden für den Modus Pkw-Fahrer normiert zu dessen Anteil im Basisszenario dargestellt. Der Einfluss des Grenzwerts für die veränderte Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit auf die Ergebnisse wird in Kapitel 6.4.2 untersucht.

6.4.1 Szenarienreihen „red-15“ und „red-30“

Abbildung 39 zeigt die zu Base normierten Anteile des Modus Pkw-Fahrer für die drei Kenngrößen Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistung und Verkehrszeitaufwand. Jedes Schaubild beinhaltet sechs Datenreihen, die jeweils einer Kombination aus einer angenommenen Zeitwahrnehmung und einer AV-ready Netzvariante bestehen.

Für steigende AV-Anteile ist der normierte Verlauf des Verkehrsaufkommens näherungsweise linear. Sind nur Straßen der Klasse S1 automatisiert befahrbar, ändert sich die Anzahl der Wege der Pkw-Fahrer praktisch nicht. Für das Netz N2 steigt diese leicht an und erreicht bei 100 % AV für red-15 +0,1 %. Mit N3 beläuft sich der Zuwachs auf bis zu 0,8 %. Für red-30 sind die Änderungen jeweils ungefähr doppelt so groß. Ähnlich zum Modus Pkw-Fahrer nimmt die Zahl der Wege für Pkw-Mitfahrer ebenfalls anteilig zu. Aktive Modi und ÖV verlieren Anteile am Verkehrsaufkommen. Der relative Rückgang ist dabei für den ÖV geringfügig stärker.

Die Anteile der Pkw-Fahrer an der Verkehrsleistung verlaufen annähernd exponentiell zum AV-Anteil und ändern sich im Vergleich zum Verkehrsaufkommen stärker zu Base. Über alle Szenarien mit 100 % AV stellen sich Zuwächse von +1 % bis +12 % ein, wobei der kleinste Zuwachs für red-15 und N1 auftritt und der größte für red-30 und N3. Die mittleren Fahrtweiten steigen in diesen Fällen um bis zu 1 % bzw. 10 %. Es fällt auf, dass die Pkw-Fahrleistung für red-30 und Netz N1 stärker zunimmt als für red-15 und N2, obwohl für letztere Szenarien das Verkehrsaufkommen höher ist. Dieser Umstand ist auf das stärkere Wachstum der mittleren Fahrtweite von bis zu +2,3 % bei red-30 im Vergleich zu höchstens +1,6 % bei red-15 zurückzuführen. Der Einfluss der mittleren Fahrtweite führt auch dazu, dass das Verhältnis der Verkehrsleistung für die Netze N2 und N3 zwischen red-30 und red-15 nun über dem des Verkehrsaufkommens von zwei liegt.

Der zu Base normierte Verkehrszeitaufwand für Pkw-Fahrer verhält sich ebenfalls annähernd exponentiell. Das Szenario Orig (100) mit red-30 und N3 zeigt mit gut 15 % Steigerung des Zeitaufwands die größte Änderung zum Basisszenario. Die mittlere Fahrtzeit steigt hierbei um 13,4 % und damit stärker als die Fahrtweite. Das bedeutet nicht nur, dass die mittlere Verlustzeit zunimmt, sondern auch, dass die streckenbezogene Verlustzeit ansteigt. Dies trifft für alle Szenarien mit den AV-ready Netzen N2 und N3 zu, da hier die zusätzliche Verkehrsleistung im Vergleich zum Basisszenario oder Original-Szenarien mit N1 vom Netz nicht mehr so effizient aufgenommen werden kann. Für das Netz

N1 steigt die mittlere Fahrtweite stärker als die Fahrtzeit an. Auch hier steigt zwar die Verlustzeit, jedoch nur in gleichem Maße wie die mittlere Fahrtzeit.

Der geringste Effekt stellt sich erneut für die Szenarien mit der Annahme red-15 und dem Netz N1 ein, für die der größte Zuwachs an Verkehrszeitaufwand für Pkw-Fahrer 0,6 % beträgt. Die Datenreihen für die anderen Annahmen der Zeitwahrnehmung und Netze verlaufen dazwischen und damit ähnlich wie für die Verkehrsleistung. Die Verläufe für red-15 und N2 sowie red-30 und N1 sind nun beinahe identisch. Erstere Szenarien weisen den bereits erwähnten stärkeren Anstieg der mittleren Fahrtzeit auf, sodass die im Vergleich niedrigere Verkehrsleistung damit auf dasselbe Niveau ansteigt.

Die Ergebnisse zeigen auch unabhängig von einer veränderten Leistungsfähigkeit, dass die veränderte Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit die Nachfrageberechnung beeinflusst. Verkürzte empfundene Fahrtzeiten erhöhen die empfundene Angebotsqualität und Erreichbarkeit und damit auch die Attraktivität des Modus Pkw-Fahrer, was sich im entsprechenden Verkehrsaufkommen zeigt. Dieselben Gründe verursachen auch Änderungen in der Zielwahl von Verkehrsteilnehmenden, die Pkw nutzen. Dies führt zu Steigerungen der Verkehrsleistung und des Verkehrszeitaufwands für Pkw-Fahrer.

Der Einfluss einer veränderten Zeitwahrnehmung auf die Routenwahl ist in den gezeigten Anteilen der Kenngrößen nicht unmittelbar erkennbar. Es folgt daher eine aufgelöste Darstellung über die Anteile der Pkw-Verkehrsleistung auf den verschiedenen Straßenklassen.

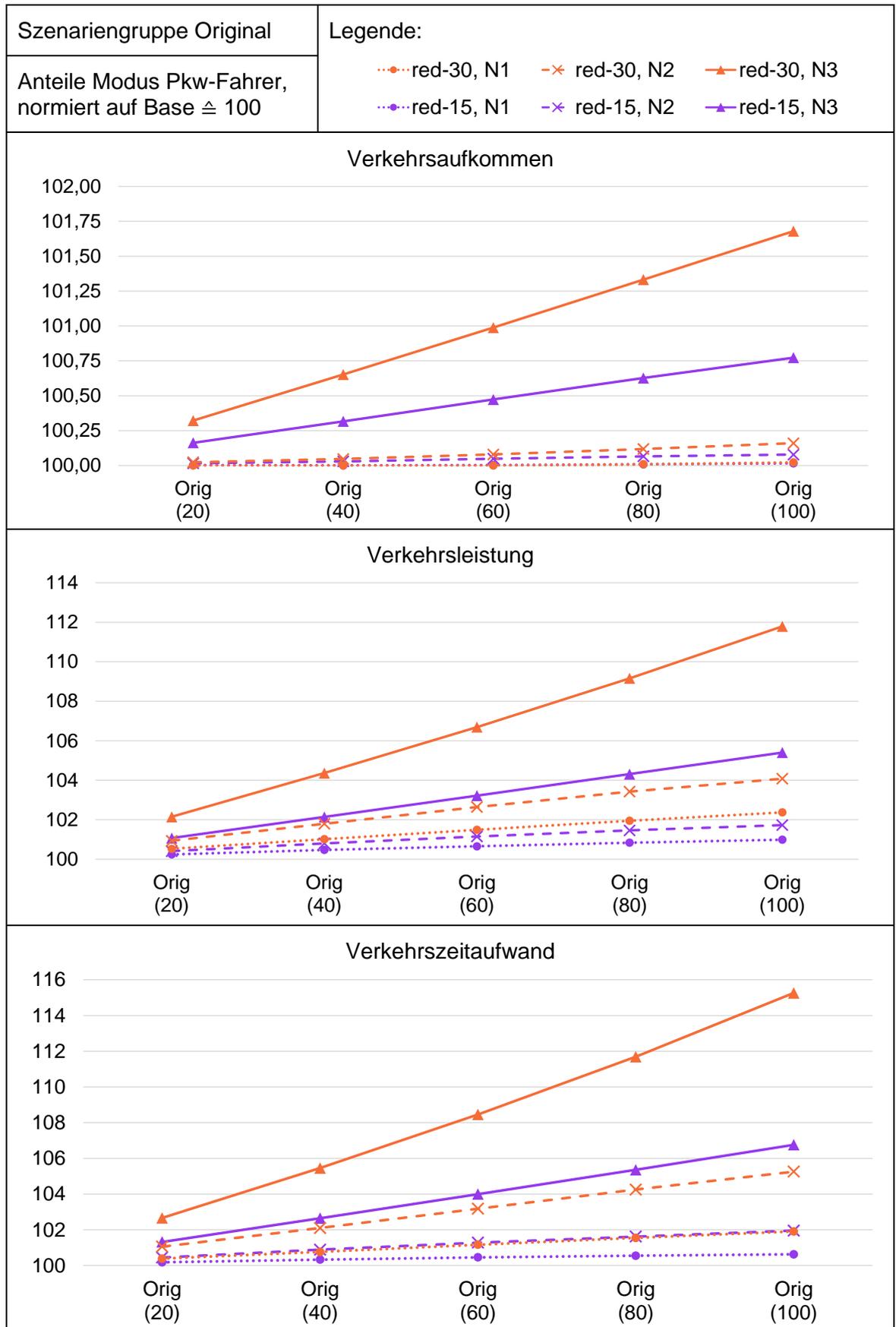


Abbildung 39: Auf Base \cong 100 normierte Anteile des Modus Pkw-Fahrer für Szenarien der Gruppe Original.

Abbildung 40 zeigt die Aufteilung der Pkw-Fahrleistung auf die Straßenklassen. Dargestellt werden die Werte des Basisszenarios sowie von sechs Original-Szenarien mit 60 % AV und der Zeitwahrnehmung red-30. Für jede Netzvariante gibt es ein Paar, das aus dem ursprünglichen Szenario besteht und durch eine Variante (*) komplettiert wird, bei der dieselbe Nachfrage des MIV ohne angepasste Widerstandsfunktionen für die Routenwahl umgelegt wird.

Um Aussagen unabhängig von absoluten Änderungen der Fahrleistung pro Straßenklasse treffen zu können, werden die Anteile pro Straßenklasse angegeben. Die Summe der Fahrleistung variiert für jede Netzvariante und unterscheidet sich von der, die im Basisszenario auftritt.

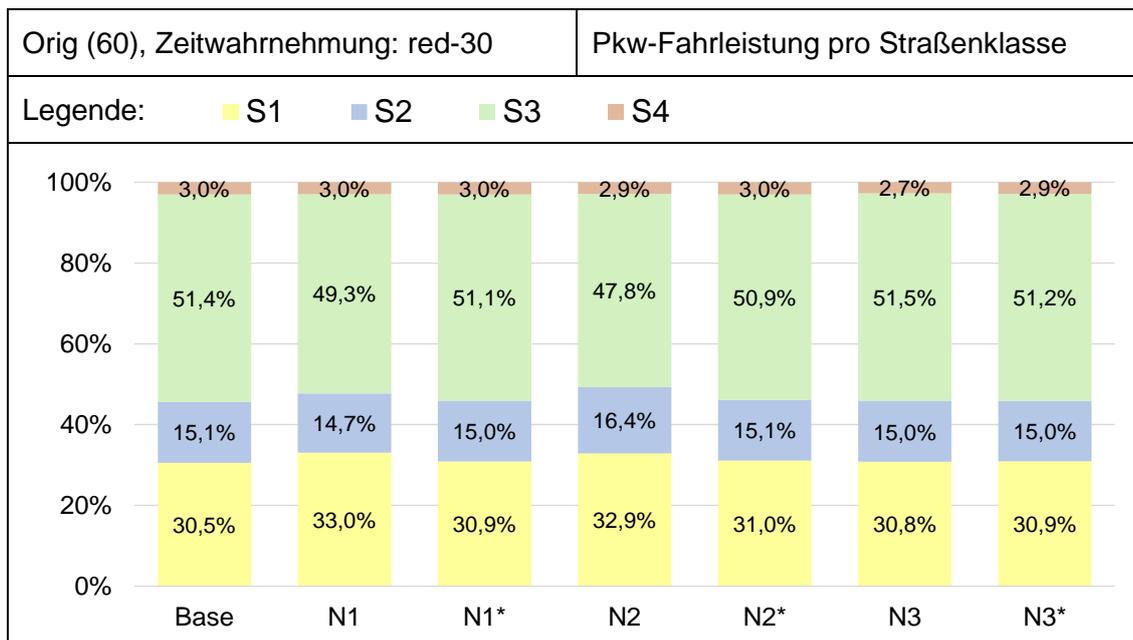


Abbildung 40: Pkw-Fahrleistung pro Straßenklassen für Base und Orig-(60)-Szenarien mit verschiedenen AV-ready Netzen (*Umlegung ohne angepasste Widerstandsfunktionen für Zeitwahrnehmung).

Die Anteile der Fahrleistung auf den automatisiert befahrbaren Straßenklassen sind in Summe stets größer als im Basisszenario. Für die AV-ready Netze N1 und N2 sind die Werte der Straßenklassen S1 bzw. S1 und S2 deutlich höher, für das Netz N3 fällt der Unterschied geringer aus. Da N3 auch die Klasse S3 als AV-ready inkludiert, sind jedoch auch der Großteil aller Straßen AV-ready und ca. 97 % der Pkw-Fahrleistung des Basisszenarios spielt sich nun darauf ab. In Summe steigt dieser Anteil dann um 0,3 %p, die die Straßenklasse S4 verliert. Innerhalb der AV-ready Straßenklassen ergeben sich nur kleine Verschiebungen. Der Effekt der erhöhten Attraktivität dieser Klassen für die Routenwahl gleicht sich zwischen diesen gewissermaßen aus.

Im Vergleich dazu ist der Unterschied der Aufteilung der Verkehrsleistung für die Szenarien ohne angepasste Widerstandsfunktionen (*) zum Basisszenario geringer. Die Werte schwanken nur geringfügig zwischen den verschiedenen Netzvarianten, da der

Widerstand als Kriterium für die Routenwahl keine empfundenen Zeitvorteile für automatisiert befahrbare Netzelemente mehr beinhaltet. Damit gibt es in dieser Hinsicht keine Unterschiede für ein Netzelement zwischen den AV-ready Netzvarianten. Die Aufteilung der Verkehrsleistung hängt dann wie auch schon ohne AV hauptsächlich von der Nachfragestruktur und daraus resultierenden Fahrtzeiten im belasteten Zustand ab.

Die Ergebnisse der Szenarien ohne angepasste Widerstandsfunktionen zeigen ebenfalls, dass die gesamte Pkw-Fahrleistung aufgrund kürzerer mittlerer Fahrtweiten zwischen 0,4 % (für N3*) und 1,0 % (für N1*) im Vergleich zum identischen Szenario mit angepassten Widerstandsfunktionen zurückgeht. Pkw-Fahrer wählen also direktere Routen und nehmen keine Umwege mehr in Kauf, um länger auf automatisiert befahrbaren Straßen gefahren zu werden.

Eine für AV angepasste Routenwahl wirkt demnach einerseits auf die Anteile der Verkehrsleistung von AV-ready Straßen und andererseits auch auf Fahrtweiten und Verkehrsleistung insgesamt.

6.4.2 Vergleich mit „Original-t5“ und „Original-t0“

Um die Sensitivität der Ergebnisse bezüglich des Grenzwerts für die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit zu untersuchen, werden weitere Szenarien berechnet und mit der Szenariengruppe Original verglichen.

Die Angaben aus Tabelle 9 und Tabelle 13 ergeben in Kombination die Übersicht in Tabelle 20 über die Annahmen für Szenarien, die die Gruppen Original-t5 und Original-t0 im Vergleich zu Original betreffen.

Szenariengruppe	Name	Parameter für Ziel- und Moduswahl		Parameter für Routenwahl	
		Wahrnehmungsparameter	Grenzwert	Wahrnehmungsparameter	Grenzwert
Original (Orig)	red-15	$\beta_t^{autom} = 0,85$	$t^l = 10 \text{ min}$	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,90$	nicht anwendbar
	red-30	$\beta_t^{autom} = 0,70$	$t^l = 10 \text{ min}$	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,80$	nicht anwendbar
Original-t5 (Orig-t5)	red-15	$\beta_t^{autom} = 0,85$	$t^l = 5 \text{ min}$	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,90$	nicht anwendbar
	red-30	$\beta_t^{autom} = 0,70$	$t^l = 5 \text{ min}$	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,80$	nicht anwendbar
Original-t0 (Orig-t0)	red-15	$\beta_t^{autom} = 0,85$	$t^l = 0 \text{ min}$	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,85$	entfällt
	red-30	$\beta_t^{autom} = 0,70$	$t^l = 0 \text{ min}$	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,70$	entfällt

Tabelle 20: Parameter für veränderte Zeitwahrnehmung in AV für Szenariengruppen Orig, Orig-t5 und Orig-t0 und verschiedene Modellstufen.

Für Orig-t0 beträgt der Grenzwert 0 min und entfällt damit praktisch. Das hat zur Folge, dass die Wahrnehmungsparameter der Ziel- und Moduswahl ohne weitere Modifikation

auch für die Routenwahl übernommen werden. Des Weiteren gibt es in dieser Szenariengruppe das Problem nicht mehr, dass empfundene Fahrtzeitvorteile überschätzt werden, wenn sich die automatisierte Fahrtzeit aus den Zeiten mehrerer AV-ready Fahrtabschnitte zusammensetzt, die jeweils alleine den Grenzwert nicht überschritten hätten.

Tabelle 21 zeigt für alle Original-Szenariengruppen die Anteile der AV-Wege, die für jede Kombination aus AV-ready Netz und Zeitwahrnehmung von empfundenen Fahrtzeitvorteilen profitieren können. Die Werte entsprechen dem Mittel für alle AV-Anteile. Zwischen dem höchsten und niedrigsten Anteil liegt stets ungefähr ein Prozentpunkt.

Die Änderung des Grenzwerts für die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit hat einen großen Einfluss auf den Anteil der AV-Wege, die empfundene Fahrtzeitvorteile erfahren. Für die Netze N1 und N2 verdoppelt sich dieser Anteil für einen Grenzwert von 5 min im Vergleich zur ursprünglichen Annahme von 10 min. Wird gar kein Grenzwert mehr angenommen, verdreifacht sich dieser ungefähr. Ist das Netz N3 AV-ready, können in Orig-t5 ca. 20 % und in Orig-t0 ca. 35 % mehr Wege mit AV profitieren.

Szenariengruppe	N1		N2		N3	
	red-15	red-30	red-15	red-30	red-15	red-30
Orig	12 %	13 %	21 %	24 %	52 %	54 %
Orig-t5	19 %	20 %	33 %	36 %	72 %	73 %
Orig-t0	38 %	40 %	63 %	65 %	87 %	88 %

Tabelle 21: Anteile der Wege mit AV, die von empfundenen Fahrtzeitvorteilen profitieren können.

Die Wirkung eines verkürzten Grenzwerts für die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit beschränkt sich nicht nur auf diesen Anteil der Wege, sondern beinhaltet auch, dass bei identischen automatisierten Fahrtzeiten eine längere Dauer anders wahrgenommen werden kann. Eine automatisierte Fahrtzeit von 20 min wird in der Szenariengruppe Orig wie 17 min empfunden, während es in Orig-t0-Szenarien nur 14 min sind.

Tabelle 22 zeigt die Änderungen der Szenarien mit 100 % AV der Gruppen Orig, Orig-t5 und Orig-t0 zum Basisszenario für alle untersuchten AV-ready Netze und die beiden Annahmen zur Reduktion der empfundenen Fahrtzeit. Innerhalb der Szenariengruppen Orig-t5 und Orig-t0 nehmen die Änderungen aller drei Kenngrößen für größere Fahrtzeitvorteile und Netze, die mehr automatisiert befahrbare Straßenklassen einschließen, stets zu. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen zu den Orig-Szenarien, für die nur beim Verkehrsaufkommen und dem Netz N1 kein relevanter Unterschied zwischen red-15 und red-30 festzustellen ist.

Über alle Kenngrößen und Annahmen zu AV-ready Netz und Zeitwahrnehmung steigen die Zuwächse mit kleiner werdendem Grenzwert deutlich an. Ohne Grenzwert und für red-30 steigt für das Netz N1 der Anteil der Wege des Modus Pkw-Fahrer um 0,5 %, für N3 sind es knapp 5 %. Das führt zu einer zusätzlichen Pkw-Fahrleistung von 5,4 % bzw. 17,3 % und einem zusätzlichen Pkw-Zeitaufwand von 5,7 % bzw. 23,3 % zu Base. Für das Netz N1 ist der Zuwachs des Verkehrszeitaufwands mit Ausnahme von Orig-t0 und

red-30 noch geringer als der Zuwachs der Verkehrsleistung. Bei den Netzen N2 und N3 steigt der Pkw-Zeitaufwand dann stärker als die Fahrleistung, was auf bezogen auf die Fahrtweite überproportional zunehmende Verlustzeiten zurückzuführen ist.

AV-ready Netz	Szenariengruppe	Verkehrsaufkommen		Verkehrsleistung		Verkehrszeitaufwand	
		red-15	red-30	red-15	red-30	red-15	red-30
N1	Orig	+0,0 %	+0,0 %	+1,0 %	+2,4 %	+0,6 %	+1,9 %
	Orig-t5	+0,1 %	+0,2 %	+1,6 %	+3,6 %	+1,3 %	+3,5 %
	Orig-t0	+0,2 %	+0,5 %	+2,4 %	+5,4 %	+2,2 %	+5,7 %
N2	Orig	+0,1 %	+0,2 %	+1,7 %	+4,1 %	+2,0 %	+5,3 %
	Orig-t5	+0,3 %	+0,6 %	+2,6 %	+5,9 %	+3,1 %	+7,8 %
	Orig-t0	+0,6 %	+1,2 %	+3,5 %	+8,1 %	+4,5 %	+11,6 %
N3	Orig	+0,8 %	+1,7 %	+5,4 %	+11,8 %	+6,8 %	+15,3 %
	Orig-t5	+1,4 %	+3,0 %	+6,8 %	+14,7 %	+8,6 %	+19,5 %
	Orig-t0	+2,3 %	+4,8 %	+8,0 %	+17,3 %	+10,3 %	+23,3 %

Tabelle 22: Änderungen zu Base für 100 % AV und drei Kenngrößen des Modus Pkw-Fahrer.

Der Verlauf der Änderungen zu Base für ansteigende AV-Anteile und alle Ausprägungen der Annahmen ist näherungsweise linear für das Verkehrsaufkommen und näherungsweise exponentiell für Verkehrsleistung und -zeitaufwand.

Die Anteile aller Modi für alle Kenngrößen und Szenarien sind im Anhang 0 zu finden.

6.5 Beurteilung und Diskussion der Ergebnisse

Die Eigenschaften der Pkw-Flotte, die sich aus den Annahmen ergeben, führen zu der Erwartung, dass sich Änderungen bezüglich der Verkehrsnachfrage ergeben müssen. Die Ergebnisse der Szenarien stimmen damit überein und zeigen, dass modale Verlagerungen im Verkehrsaufkommen und Änderungen in der Zielwahl in Abhängigkeit von der Attraktivität des Modus Pkw-Fahrer auftreten. Außerdem passen Pkw-Fahrer ihre Routenwahl an.

Um die Sensitivität des Modells gegenüber den getroffenen Annahmen zu beurteilen, werden die Ergebnisse mit denen der in der Literaturübersicht vorgestellten Studien verglichen. Grundsätzlich stimmen die Trends der Auswirkungen von AV auf die Pkw-Fahrleistung und, falls berücksichtigt, auf den Anteil von Wegen mit Pkw am Verkehrsaufkommen der vorliegenden Arbeit damit überein. Da die meisten Studien vollautomatisierte Fahrzeuge mit einer vollständigen Durchdringung der privaten Fahrzeugflotte untersuchen, erscheint ein quantitativer Vergleich für die Szenarien der Gruppe Prevalent mit Advanced AV und hohen AV-Anteilen angemessen.

Für 100 % AV und lediglich einer veränderten Leistungsfähigkeit von AV zeigt das Modell der Region Stuttgart ein Anstieg der Pkw-Fahrleistung von bis zu 5 %. AULD ET

AL. (2017) ermitteln unter der Annahme eines Kapazitätswachses von 80 % für das Modell von Chicago ein Zuwachs von 4 %. Mit der Berücksichtigung einer veränderten Wahrnehmung automatisierter Fahrzeit, verursachen 100 % AV eine Erhöhung der Fahrleistung von bis zu 18 %. Dies zeigt deutlich, dass die Annahmen zur Fahrzeitwahrnehmung die Ergebnisse in größerem Maße beeinflussen. Im Vergleich dazu liegt die Steigerung der Fahrleistung bei 4-24 % für die Modellierungsstudien, deren Annahmen durchweg extremer, aber immer noch ähnlich zu denen dieser Arbeit sind (GUCWA (2014), CHILDRESS ET AL. (2015), KIM ET AL. (2015), AULD ET AL. (2017), DIAS ET AL. (2020)).

DIAS ET AL. (2020) untersuchen für die Metropolregion Dallas-Fort-Worth ebenfalls den Einfluss von AV mit einer schlechteren Leistungsfähigkeit (-10 %) und reduzierter empfundener Fahrzeit (-25 %), jedoch mit um 5-10 % erhöhten Mobilitätsraten für Haushalte mit AV. Für 40% AV ermitteln sie 2% mehr Pkw-Wege, 3% mehr FzgKm und 10% mehr FzgStd. Dieses Szenario von DIAS ET AL. (2020) ist durchaus vergleichbar mit Szenarien der Gruppe Introductory, weil dafür die mit der Fahrleistung pro Straßenklasse gemittelte Leistungsfähigkeit in einer sehr ähnlichen Größenordnung liegt, sofern das AV-ready Netz N2 oder N3 herangezogen wird. Für Intr-(40)-Szenarien bei red-30 und Netz N3 ergeben sich Steigerungen von 0,4 % für Pkw-Wege, 3 % für FzgKm und 5,5 % für FzgStd.

Die unterschiedliche Auswirkung von AV auf den Anteil der Pkw-Wege lässt sich auf die bei DIAS ET AL. (2020) erhöhten Mobilitätsraten für AV-Haushalte zurückführen. Das trifft für die vorliegende Arbeit nicht zu, da die Verkehrserzeugung im Modell der Region Stuttgart unverändert bleibt. Die tendenziellen Änderungen der Fahrleistung und des Zeitaufwands für Pkw sind gleich. Für die Zunahme an Pkw-Wegen im Modell Dallas-Fort-Worth scheint die Verkehrsleistung relativ gesehen weniger stark anzusteigen, der Verkehrszeitaufwand dafür umso mehr. Mögliche Gründe für die Abweichungen zwischen den Modellen sind das zugrundeliegende Mobilitätsverhalten an sich oder die Auslastung im Netz.

Die Größenordnung der vorgestellten Ergebnisse liegt im Bereich derer anderer Studien. Dies sollte jedoch nicht überbewertet werden, da es zahlreiche Unterschiede in den Annahmen und Vereinfachungen gibt. Die meisten Studien betrachten im Gegensatz zu vorliegender Arbeit vollautomatisierte Fahrzeuge. Die Berücksichtigung dieser schließt Effekt wie induzierten Verkehr durch Personen ohne Fahrerlaubnis oder mit Mobilitätseinschränkungen und das eigenständige Umsetzen von Fahrzeugen ein. Letzteres verursacht zusätzlichen Verkehr durch Leerfahrten und Veränderungen des Parkdrucks aufgrund von Parkkostenvermeidung.

Darüber hinaus vernachlässigt es die vorliegende Arbeit, die Einführung von AV in die private Fahrzeugflotte im Modell zu prognostizieren. Stattdessen wird der Anteil vorgegeben. Gegenbeispiele sind KRÖGER ET AL. (2019), die ein Fahrzeugdiffusionsmodell verwenden und LEVIN UND BOYLES (2015) als auch DIAS ET AL. (2020), die die AV-Verfügbarkeit schrittweise in Abhängigkeit vom Haushaltseinkommen einführen. Weitere Modellierungsstudien berücksichtigen ebenfalls Auswirkungen auf die

Verkehrsnachfrage durch veränderte Betriebskosten (KIM ET AL. (2015)), Parkkosten (CHILDRESS ET AL. (2015), LEVIN UND BOYLES (2015)) und Verkürzungen der Zu- und Abgangszeiten (KRÖGER ET AL. (2019)) aufgrund eines effizienteren Parkvorgangs.

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf das Abbilden verschiedener Zustände, die sich aus unterschiedlichen Eigenschaften und Anteilen von nicht vollautomatisierten AV zusammensetzen. Es wird versucht, die mutmaßlich lange Übergangszeit, in der CV und AV gleichzeitig vorkommen, bis zur vollständigen AV-Marktdurchdringung darzustellen.

In den Szenarienreihen werden AV-Anteil und AV-Klasse und damit Leistungsfähigkeit der Fahrzeugflotte verändert. Ansonsten bleibt innerhalb jeder Szenarienreihe die AV-ready Netzvariante und die Annahme für die Zeitwahrnehmung gleich. Keine der Szenarienreihen beansprucht für sich, als wahrscheinlichste Prognose zu gelten. Es ist auch denkbar, dass sich im Verlauf der AV-Marktdurchdringung von 0 % bis 100 % die AV-Klasse, das AV-ready Netz und die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit über einen langen Zeitraum gleichzeitig ändern. Keine Szenarienreihe bildet eine solche Entwicklung direkt ab. Nichtsdestotrotz werden über mehrere Szenarienreihen gesehen Bandbreiten von Wirkungen automatisierter Fahrzeuge ermittelt.

Ein weiterer zentraler Aspekt, in dem sich die vorliegende Arbeit von anderen Studien abhebt, ist die Unterscheidung von Straßenklassen aufgrund ihres Ausbauzustandes und darauf aufbauend AV-ready Netzvarianten. Die Einteilung in AV-ready und nicht-AV-ready kann natürlich auch aufgrund anderer Kriterien getroffen werden. Es ist jedoch wichtig, verschiedene Annahmen dafür zu untersuchen, weil unklar ist, welche Teile des Straßennetzes in Zukunft von AV auch automatisiert befahren werden können oder dürfen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorgabe einer AV-ready Netzvariante für Szenarien kritisch ist, weil diese zu großen Unterschieden im Mobilitätsverhalten und in der Nachfrage führen kann. Die Wirkungen von AV hängen im Allgemeinen davon ab, welcher Anteil der Verkehrsleistung automatisiert fährt und welche Annahmen dafür gelten. Der Anteil der Fahrleistung auf den Straßen, die AV-ready sind, wird höchstwahrscheinlich ansteigen, sofern sich aus deren Nutzung tatsächliche oder empfundene Vorteile für Pkw-Reisende ergeben. Das wirft die Frage auf, ob und inwiefern es gewollt oder überhaupt möglich ist, dass bestimmte Teile des Straßennetzes einer höheren Verkehrsbelastung ausgesetzt werden. Schließlich legt die Fahrfunktionalität von AV und die zugehörigen ODD fest, auf welchen Straßen automatisiert gefahren werden kann, jedoch können auch regulatorische Festlegungen einer Stadt oder Region bestimmen, auf welchen Straßen automatisiert gefahren werden darf.

6.6 Zwischenfazit

Im Prognose-Nullfall des VRS-Modells, auch als Basisszenario bezeichnet, ist der Modus Pkw-Fahrer für knapp die Hälfte aller Wege mit Start und Ziel in der Region und zwei Drittel der gesamten Verkehrsleistung verantwortlich. Ebenfalls knapp die Hälfte des Zeitaufwands im Verkehr verbringen Personen mit Fahren eines Pkw.

Um die Wirkungen von AV auf das Mobilitätsverhalten und die Verkehrsnachfrage zu untersuchen, werden die Ergebnisse der in Kapitel 5.7 definierten Szenarien mit denen des Basisszenarios verglichen. Den Hauptteil dafür bilden die Szenariengruppen Introductory, Established und Prevalent, die mit verschiedenen AV-Anteilen und jeweils einer AV-Klasse, die je nach Straßenklassen unterschiedliche Leistungsfähigkeiten aufweisen, gemeinsam mit dem Basisszenario den Verlauf von 0 % bis 100 % AV darstellen. Verschiedene Annahmen zur Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit und der Netzvariante, die AV-ready und damit automatisiert befahrbar ist, bilden Szenariensreihen.

Abbildung 41 zeigt die Verläufe der zum Basisszenario auf den Wert 100 normierten Kenngrößen Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistung und Verkehrszeitaufwand für den Modus Pkw-Fahrer für alle innerhalb der Szenariengruppen Introductory, Established und Prevalent untersuchten Ausprägungen der Annahmen. Die Kombination aus drei AV-ready Netzvarianten und drei Annahmen für die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit ergibt neun Datenreihen.

In der ersten Szenariengruppe Introductory werden niedrigere AV-Anteile angenommen und die Fahrzeugklasse Basic AV eingesetzt. Diese AV können auf weiten Teilen des Netzes noch nicht automatisiert fahren und weisen ansonsten eine geringere Leistungsfähigkeit auf als CV. Die resultierenden Fahrtzeitverlängerungen führen für alle Introductory-Szenarien, in denen keine empfundene Zeitvorteile auf dem Großteil des Netzes angenommen werden, zu geringen Verlagerungen im Verkehrsaufkommen zu anderen Modi von bis zu 0,5 %. Mit einer angepassten Zeitwahrnehmung bleibt der Anteil der Pkw-Fahrer am Verkehrsaufkommen ungefähr gleich oder nimmt um 0,5 % zu. Dies zeigt, dass mit der Verfügbarkeit automatisierter Fahrfunktionalität die Möglichkeit, während der Fahrt fahrfremde Tätigkeiten ausführen zu können, die Nutzung von Pkw komfortabler und damit attraktiver machen kann.

Die Änderungen der Fahrleistung sind tendenziell ähnlich zu denen des Verkehrsaufkommens, bewegen sich aber im Bereich von -2 % für eine normale Zeitwahrnehmung bis +5 % bei den größten empfundenen Fahrtzeitvorteilen. Die geringere Leistungsfähigkeit gleicht die Reduktion der Fahrleistung aus, sodass sich für keine Szenarien in der Gruppe Introductory Einsparungen im Zeitaufwand ergeben. Mit empfundenen Zeitvorteilen steigt der Verkehrszeitaufwand für Pkw-Fahrer mit zunehmender AV-ready Netzdichte stets an und weist im extremsten Fall ein Plus von 8 % auf.

In der Gruppe Established sind die AV-Anteile etwas höher und die zugehörige Fahrzeugklasse Intermediate AV teilweise leistungsfähiger. Für die Straßenklasse S3 kommt automatisiertes Fahren auch in Frage, wenn auch mit vorsichtigerer Fahrweise.

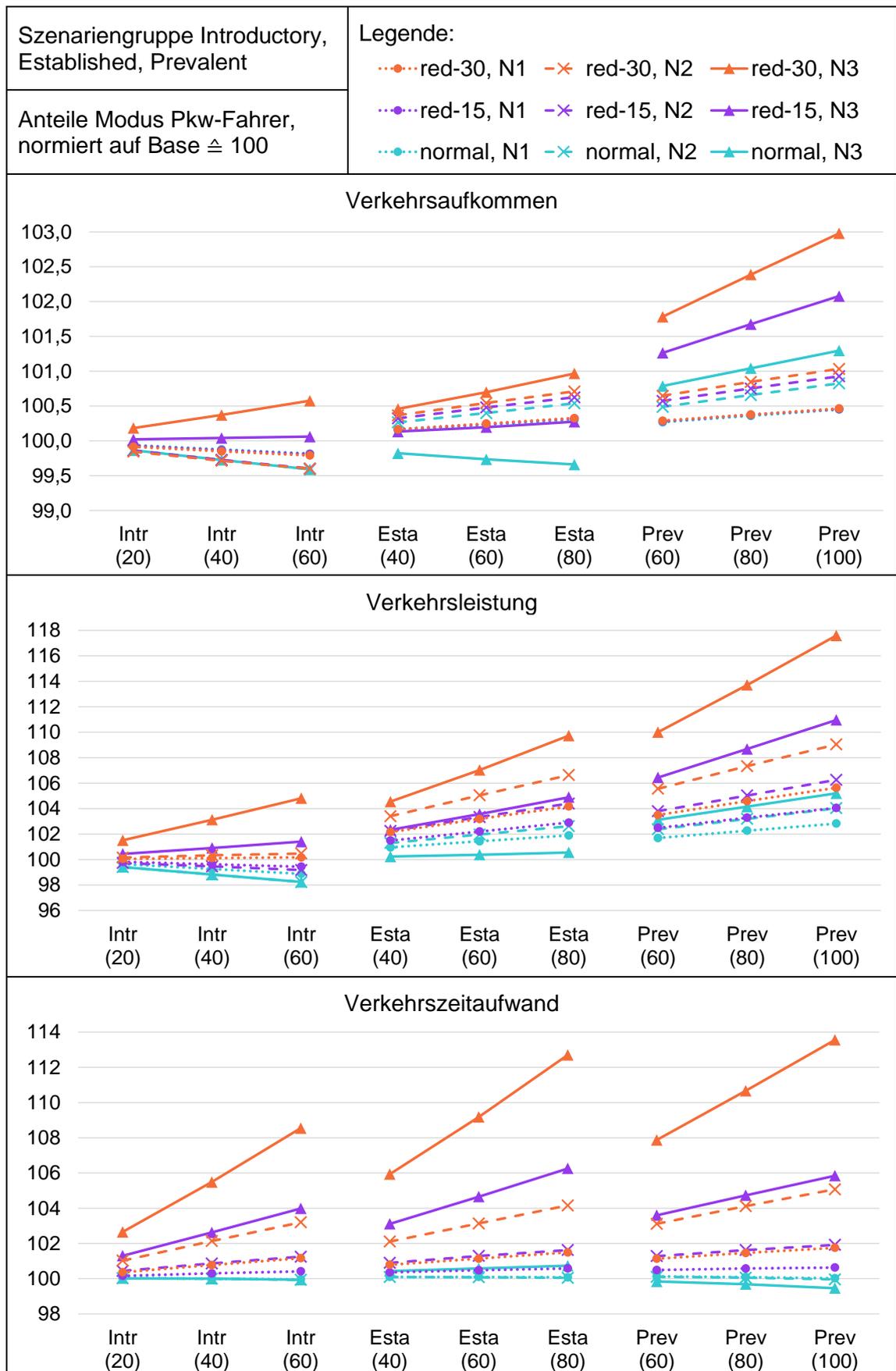


Abbildung 41: Auf Modus Pkw-Fahrer in Base $\hat{=}$ 100 normierte Anteile der Pkw-Fahrer für Szenarien der Gruppen Introductory, Established und Prevalent

Das Verkehrsaufkommen des Modus Pkw-Fahrer nimmt für beinahe alle untersuchten Annahmen zu und steigt um bis zu 1 %. Nur, wenn es keine wahrgenommenen Zeitvorteile durch automatisiertes Fahren gibt und AV auf weniger gut ausgebauten Straßen defensiver und damit weniger leistungsfähig fahren, kommt es zu einem geringfügigen Rückgang bei den Pkw-Wegen. Für diesen Fall ändern sich die Fahrleistung kaum, ansonsten kommt es zu Zuwächsen von 2-10 %. Bei unveränderter Fahrtzeitwahrnehmung und den AV-ready Netzen N1 und N2 bleibt der Zeitaufwand für Pkw-Fahrer konstant. Für die anderen Szenarienreihen nimmt dieser um bis zu 13 % zu. Die stärksten Änderungen für Fahrleistung und Zeitaufwand treten bei den größten empfundenen Fahrzeitleistungen auf. Die veränderte Fahrtzeitwahrnehmung lässt das Reisen mit Pkw komfortabler erscheinen und dadurch wird das Ansteuern weiter entfernter Ziele wahrscheinlicher, sodass sich mittlere Fahrtweite und Fahrtzeit erhöhen. Zusammen mit dem höheren AV-Anteil und dem größeren Pkw-Verkehrsaufkommen nehmen die maximalen Änderungen zum Basisszenario zu.

Für die Szenariengruppe Prevalent werden Advanced AV angenommen, die die private Fahrzeugflotte bis hin zur vollständigen Durchdringung dominieren und auf allen Straßen, auf denen automatisiert gefahren werden kann, leistungsfähiger als CV sind.

Über alle Szenarienreihen ergeben sich für 100 % Advanced AV Anstiege des Pkw-Verkehrsaufkommens zwischen 0,5 % und 3 %. Mit einer zunehmenden Netzlänge, die automatisiert befahren werden kann, steigt auch die Anzahl der Personen, die den Modus wechseln und Pkw nutzen. Für Verlagerungen im Verkehrsaufkommen für diese wie auch die anderen Szenariengruppen gilt, dass sich diese hauptsächlich auf den ÖV auswirken und Rad und Fuß jeweils weniger stark davon betroffen sind. Der Grund liegt darin, dass für Pkw-Wege die Angebotsqualität des ÖV der von Pkw meist am nächsten kommt.

Die Pkw-Fahrleistung nimmt für alle AV-Anteile und Prevalent-Szenarien in einer Bandbreite von +2-18 % zu. Die Szenarienreihen, die eine veränderte Zeitwahrnehmung für große Teile des Straßennetzes annehmen, weisen dabei die höchsten Zuwächse auf.

Der Zeitaufwand von Pkw-Fahrern bleibt für eine normale Zeitwahrnehmung unverändert oder geht minimal zurück, ansonsten steigt dieser um bis zu 14 % an. Der Trend von länger werdenden Fahrtweiten und Fahrtzeiten wird durch die höhere Leistungsfähigkeit der Advanced AV verstärkt. Eben diese ist jedoch auch der Grund dafür, dass gegensätzlich zu Established-Szenarien die mittlere Fahrtzeit weniger stark zunimmt als die mittlere Fahrtweite.

Tatsächliche und empfundene Fahrtzeitgewinne können sich nicht in dem Ausmaß manifestieren, wie durch die Annahmen bei gleichbleibendem Mobilitätsverhalten zu vermuten ist. Die erhöhte Attraktivität des Modus Pkw-Fahrer sowie die dazugehörige bessere Erreichbarkeit von Zielen wirken in Form des Rebound-Effekts auf die Verkehrsnachfrage.

Für das Ausmaß der Wirkungen von AV auf alle Kenngrößen ist es entscheidend, welche Netzvariante als AV-ready gilt. Damit geht einher, wie lang das automatisiert befahrbare

Straßennetz ist und welche Größenordnung der Verkehrsleistung auf diesem stattfindet. Ebenso ergibt sich daraus, wie viele Wege von empfundenen Zeitvorteilen profitieren können. Die Auswertungen zeigen außerdem, dass die Verkehrsleistung auf AV-ready Straßen, sofern die Nutzung von AV mit tatsächlichen oder empfundenen Vorteilen verbunden ist, aufgrund des angepassten Routenwahlverhaltens der Pkw-Fahrer im Verhältnis stärker zunimmt.

Grundsätzlich gilt, dass die angepasste Zeitwahrnehmung einen größeren Einfluss auf die Ergebnisse hat, weil die empfundene Fahrtzeit, sofern sie automatisiert zurückgelegt ist und den Grenzwert überschreitet, direkt in relevantem Maße reduziert wird. Die Höhe des Grenzwerts für die angepasste Zeitwahrnehmung kann die Änderungen der Kenngrößen im Vergleich zum Basisszenario drastisch beeinflussen und ist umso entscheidender, umso weniger Straßen automatisiert befahrbar sind.

Im Vergleich dazu wirkt die veränderte Leistungsfähigkeit direkt für jedes AV-ready Netzelement, für das die Fahrtzeit auslastungsabhängig berechnet wird. Inwiefern sich die Fahrtzeit deswegen tatsächlich ändert, hängt jedoch von der Auslastung ohne und mit AV und vom induzierten Verkehrsaufkommen ab. Ferner stellen Pkw (CV und AV) nur einen Teil der Fahrzeuge des MIV, der auch noch Lkw-Verkehr und externen Pkw-Verkehr einschließt. Dadurch ändert sich die Belastung in Pkw-Einheiten über das Netz gesehen weniger stark, als durch die von AV verursachte Änderung der Belastung.

Mit der Szenariengruppe Prevalent-Extreme wird untersucht, welchen Unterschied es macht, wenn Advanced AV auch auf Erschließungsstraßen und damit überall automatisiert fahren können. Dabei gilt allerdings weiterhin, dass AV nicht vollautomatisiert fahren und nur Personen mit Fahrerlaubnis für eine Nutzung in Frage kommen. Obwohl diese Straßenklasse 60 % der Netzlänge in der Region stellt, finden nur 3 % der Verkehrsleistung darauf statt. Die größten Unterschiede im Vergleich zu den Ergebnissen des Basisszenarios treten bei 100 % AV und für die größten empfundenen Zeitvorteile auf und betragen +0,4 %p für das Verkehrsaufkommen, +1,0 %p für die Fahrleistung und +1,6 %p für den Zeitaufwand.

7 Fazit

Mit der fortschreitenden Entwicklung in der Fahrzeugtechnik, die eine zunehmende Automatisierung der Fahraufgabe als Ziel hat, wird sich in den kommenden Jahren die Funktionalität von Pkw und damit deren Nutzung verändern. Noch sind die Auswirkungen der Fahrzeugautomatisierung auf Verkehrsablauf und Mobilitätsverhalten nur unzureichend bekannt. Dies erschwert eine Prognose der künftigen Verkehrsnachfrage.

Die Modellierung wahrscheinlicher technischer Entwicklungen bei automatisierten Fahrzeugen und zugehöriger regulatorischer Maßnahmen kann Planern und Entscheidungsträgern helfen, mögliche Auswirkungen auf den zukünftigen Verkehr besser zu verstehen. Verkehrsnachfragemodelle sind, sofern sie sinnvoll spezifiziert und mit beobachteten Werten validiert werden, dafür geeignet und stellen damit ein wichtiges Werkzeug der Verkehrsplanung dar.

Bisher resultierte die Unsicherheit einer Verkehrsprognose vor allem aus Unsicherheiten bei der Bevölkerungsentwicklung, bei der Preisentwicklung oder beim Pkw-Besitz. Dies könnte sich aufgrund von automatisierten Fahrzeugen ändern, wie die Vielzahl an Forschungsarbeiten zu deren prognostizierter Marktdurchdringung und potenziellen Wirkungen zeigt. Von den antizipierten Wirkungen automatisierter Fahrzeuge weisen die Einflüsse auf den Verkehrsablauf und auf die Fahrtzeitwahrnehmung unmittelbaren Bezug zur Verkehrsnachfragemodellierung auf und sind daher von zentraler Bedeutung für diese Arbeit.

Automatisierte Fahrzeuge werden ein anderes Fahrverhalten als Menschen zeigen und folglich Fahrtzeiten im Verkehrsnetz in Abhängigkeit des Anteils dieser Fahrzeuge in der Fahrzeugflotte verändern. Diese Einflussgrößen müssen auf geeignete Weise in vorhandene Fahrzeitermittlungsmodelle integriert werden.

Hochgradig automatisierte Fahrzeuge erlauben es den Personen, die sonst die Fahraufgabe übernehmen, einen Teil der im Fahrzeug verbrachten Zeit mit anderen Aktivitäten zu verbringen. Dies führt zu der Annahme, dass sich die Wahrnehmung der Fahrtzeit in automatisierten Fahrzeugen von derjenigen in konventionellen Fahrzeugen unterscheidet.

Änderungen von tatsächlichen oder empfundenen Fahrtzeiten sind entscheidend für den Ablauf eines Verkehrsnachfragemodells, weil diese die Angebotsqualität beeinflussen, die sich durch Rückkopplung in der Nachfrageberechnung auf die Ziel-, Modus- und Routenwahl auswirkt. Damit wirken sich die erwähnten Einflussgrößen auf Mobilitätsverhalten und Verkehrsnachfrage aus. Verkehrsnachfragemodelle müssen diese Einflüsse adäquat abbilden können. Dies führt zur Notwendigkeit, die Modelle dafür zu erweitern, sodass Nachfragewirkungen automatisierter Fahrzeuge abgeschätzt werden können.

In dieser Arbeit werden Modellierungsmethoden vorgestellt, um die Eigenschaften und Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle zu integrieren. Der Zweck dieser Methoden ist es, den Personen, die solche

bestehenden Modelle anwenden, eine Möglichkeit zur Erweiterung dieser aufzuzeigen, damit diese basierend auf Daten zu AV oder Annahmen Prognosen erstellen können.

Um die Wirkungen eines veränderten Fahrverhaltens von AV in Fahrzeitermittlungsmodellen zu berücksichtigen, wird das Konzept der Pkw-Einheiten erweitert. Dieses Konzept umfasst die Umrechnung der Fahrzeuganzahl aller Fahrzeugtypen in die Einheit herkömmlicher Pkw. Die Leistungsfähigkeit eines AV wird dann über Pkw-Einheiten-Faktoren angegeben, die von der Funktionalität des Fahrzeugs und vom Typ der Straßenanlage abhängen können.

Eine weitere Methode bildet Kapazität und Nachfrage in Fahrzeug- oder Zeiteinheiten ab und errechnet die Auslastung mithilfe von Zeitlücken zwischen Fahrzeugen und mit den Fahrzeuglängen. Fahrtzeiten für den belasteten Zustand werden dann in beiden Methoden mit auslastungsabhängigen Modellen, die Kapazitätsbeschränkungsfunktionen nutzen, ermittelt.

Die Arbeit stellt auch eine Methode vor, um die Fahrtzeitwahrnehmung in AV, die nicht vollautomatisiert und damit Teil des Modus Pkw-Fahrer sind, anzupassen. Um diese Wirkungen abbilden zu können, müssen im Modell manuelle und automatisierte Fahrtzeit getrennt ermittelt werden. Die automatisierte Fahrtzeit wird mit einem zusätzlichen, vorzugebenden Parameter multipliziert. Dies wirkt sich auf die Routenwahl aus. Anhand des AV-Anteils werden die empfundenen Fahrtzeiten für die Verkehrssysteme CV und AV gewichtet gemittelt, um eine empfundene Fahrtzeiten des Modus Pkw-Fahrer als Input für die Modellstufen der Ziel- und Moduswahl zu erhalten.

Der Parameter für die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit kann auf der Grundlage vergleichbarer Modi oder anhand von Erkenntnissen aus Umfragen zur angegebenen Nutzungspräferenz von AV angenommen werden. Die Vorgabe des Parameters für die Modellanwendung in dieser Arbeit sieht ausschließlich eine Reduktion der empfundenen automatisierten Fahrtzeit vor und folgt damit Annahmen, die sich an den Erkenntnissen der Literaturlauswertung orientieren. Derzeit geht die Methode von einem einzigen Parameter für die Fahrtzeitwahrnehmung mit AV und damit von einer einheitlichen Wirkung für alle Personengruppen und Reisezwecke aus.

Die für die Modellanwendung verwendeten Faktoren für die Pkw-Einheiten von AV werden durch die Auswertung von Daten mikroskopischer Verkehrsflusssimulationen ermittelt. Die zugrundeliegenden Fahrverhalten basieren teils auf Beobachtungen von AV auf einer Teststrecke in den Niederlanden, teils auf Auswertungen mikroskopischer Co-Simulationen mit einer automatisierten Fahrverhaltenslogik und werden durch Annahmen ergänzt.

Beide Methoden werden im makroskopischen Verkehrsnachfragemodell des Verbands der Region Stuttgart angewendet, um Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge zu untersuchen. Der Anteil von AV an der privaten Pkw-Flotte wird vorgegeben. Es gibt keine Veränderungen im Pkw-Besitz. Im Rahmen dieser Arbeit befinden sich AV ausschließlich in Privatbesitz, sind hochautomatisiert und benötigen daher immer noch eine Person mit Fahrerlaubnis und Pkw-Verfügbarkeit. Daher sind automatisierte Fahrzeuge weder

Teil neuartiger Mobilitätsdienstleistungen, noch führen sie zu neuen Pkw-Fahrten von Menschen ohne Zugang zu einem Pkw oder mit Mobilitätseinschränkungen.

Automatisierte Fahrzeuge können nur auf AV-ready Straßen automatisiert fahren. In der Modellanwendung kommen mehrere Varianten von AV-ready Netzen zum Einsatz, die ein unterschiedlich dichtes Straßennetz als automatisiert befahrbar beinhalten.

Für automatisierte Fahrzeuge der ersten Generation wird ein vorsichtigeres Fahrverhalten zugrunde gelegt. Diese beeinflussen dadurch den Verkehrsablauf im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen negativ und verursachen Fahrtzeitverlängerungen. Bei dieser geringeren Leistungsfähigkeit von AV gehen Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung für Pkw-Modi geringfügig zurück. Für Letzteres sind neben dem Anteil an den Wegen auch kürzere Fahrtweiten verantwortlich.

Mit fortschreitender technologischer Entwicklung kann das Fahrverhalten so verbessert werden, dass AV leistungsfähiger als CV sind und den Verkehrsablauf positiv beeinflussen können. Das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistung der Pkw-Modi nehmen zu. Der Effekt, dass Fahrtzeiteinsparungen durch die höhere Leistungsfähigkeit der Fahrzeugflotte nicht wie erwartet bzw. in vollem Maße auftreten, wird auch als Rebound bezeichnet.

Der Verkehrszeitaufwand bleibt für Pkw-Fahrer in Summe annähernd gleich, weil sich Änderungen der Leistungsfähigkeit und der Fahrtweiten gegenseitig weitestgehend ausgleichen. Dies gilt unabhängig davon, ob AV mit ihrem Fahrverhalten den Verkehrsablauf positiv oder negativ beeinflussen.

Eine veränderte Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit, sodass diese als kürzer empfunden wird, erhöht für alle untersuchten Szenarien die empfundene Angebotsqualität und Erreichbarkeit von Zielen und macht den Modus Pkw-Fahrer damit attraktiver. Reisende können davon profitieren, nicht mehr selbst fahren zu müssen, weil sie ihre Zeit teilweise für fahrfremde Tätigkeiten nutzen können. Wirkungen aus einer geringeren Leistungsfähigkeit werden ausgeglichen oder übertroffen und Wirkungen aus einer erhöhten Leistungsfähigkeit verstärkt. In der Folge nimmt die Anzahl der Wege mit Pkw um bis zu 3 % zu. Von den anderen Modi, die Anteile verlieren, ist der ÖV am stärksten betroffen.

Die angepasste Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit wirkt sich besonders auf die mittleren Fahrtweiten und die Verkehrsleistung durch Änderungen in der Ziel- und Routenwahl aus. Letztere steigt für eine vollständig automatisierte Pkw-Flotte um bis zu 18 %.

Die mittlere Fahrtzeiten und der Verkehrszeitaufwand für Pkw-Fahrer entwickeln sich abhängig davon, ob und in welchem Ausmaß eine erhöhte Verkehrsleistung aufgrund modaler Verlagerungen im Verkehrsaufkommen und größeren Fahrtweiten durch die Leistungsfähigkeit von AV kompensiert werden können. Der Zeitaufwand und die mittlere Fahrtzeit steigen in allen Szenarien mit angepasster Zeitwahrnehmung, aber nicht in jedem Fall so stark wie die mittlere Fahrtweite. Der maximale Zuwachs im Verkehrszeitaufwand der Pkw-Fahrer beträgt 14 %. Auch hier wirken Rebound-Effekte, die sich

über gestiegene tatsächliche Fahrtzeiten manifestieren, die die empfundenen Zeitvorteile größtenteils ausgleichen.

Grundsätzlich gilt, dass die Wirkungen mit steigendem AV-Anteil stärker ausfallen. Für die Ergebnisse ist ebenfalls entscheidend, welches AV-ready Netz zugrunde gelegt wird. Um von den Vorteilen automatisierten Fahrens profitieren zu können, sind Personen bereit, ihre Routenwahl anzupassen. Dies führt dazu, dass die Belastung auf den automatisiert befahrbaren Straßen im Verhältnis stärker zunimmt.

Je höher die Verkehrsleistung, die auf einer Straße abgewickelt wird, desto größer ist auch der Einfluss aus der automatisierten Befahrbarkeit dieser Straße, den beispielsweise eine veränderte Leistungsfähigkeit von AV mit sich bringt. Auch für Effekte aus einer veränderten Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit ist das AV-ready Netz maßgeblich, weil der Anzahl der Wege mit AV, die davon profitieren können, direkt davon abhängt. Daher sind die Wirkungen für AV-ready Netzvarianten, die größere Teile des gesamten Netzes abdecken, stets größer.

Ausblick

Die Modellergebnisse zeigen, dass aufgrund der fortschrittlichen Fähigkeiten hochautomatisierter Fahrzeuge der Pkw-Verkehrsleistung in der Region Stuttgart um etwa 18 % zunehmen könnte. Die Vorteile des automatisierten Fahrens für die Personen, die diese nutzen, bringen also auch erhebliche negative Auswirkungen mit sich, die aus der Zunahme des Straßenverkehrs resultieren.

Die politischen Entscheidungsträger sollten sich dieser möglichen Auswirkungen der Fahrzeugautomatisierung auf den Straßenverkehr bewusst sein. Die Erkenntnisse aus der Modellanwendung können als Grundlage für die Diskussion über geeignete Maßnahmen aus der Verkehrsplanung dienen, um negative Folgen abzumildern oder zu vermeiden.

Solche Maßnahmen müssen die Nutzung der zum Pkw konkurrierenden Modi attraktiver machen. Dies kann auf der einen Seite durch die Förderung anderer Verkehrsmodi mit Pull-Maßnahmen, wie der Verbesserung des ÖV-Angebots durch Vergünstigungen und Taktverdichtungen oder dem Einrichten neuer Radwege, geschehen. Auf der anderen Seite kann die Pkw-Nutzung durch Push-Maßnahmen eingeschränkt werden, indem die Angebotsqualität verringert wird. Beispiele für letzteres Ziel sind die Erhöhung der Kosten für Kraftstoff oder Parken, die Reduktion von Parkmöglichkeiten, die Einführung strengerer Geschwindigkeitsbeschränkungen oder die Sperrung von Straßen für Kfz.

Weiterer Forschungsbedarf

Die Methoden und deren Anwendung in dieser Arbeit treffen diverse Vereinfachungen und nutzen Annahmen, um Nachfragewirkungen in makroskopischen Verkehrsnachfragemodelle abzuschätzen. Die Aufgabe zukünftiger Forschung besteht darin, diese Vereinfachungen soweit möglich aufzulösen und die Annahmen auf eine bessere empirische Basis zu stellen. Dies kann beispielsweise die Prognose darüber betreffen, wie

schnell sich AV in der privaten Fahrzeugflotte verbreiten und welchen Anteil sie zu einem bestimmten Zeitpunkt ausmachen können. Dazu ist die Kenntnis der Akzeptanz und Zahlungsbereitschaft der in einem Modell abgedeckten oder damit vergleichbaren Bevölkerung notwendig.

Eine Anpassung des Mobilitätsverhaltens bezüglich der Anzahl der Wege von Personen mit Zugang zu AV könnte zukünftig auch für die Nachfragemodellierung in Betracht gezogen werden. Auch, wenn AV noch nicht vollautomatisiert sind, könnte es mittel- und langfristig zu Änderungen der Mobilitätsraten dieser Personen kommen. Diese Mobilitätsraten für AV-Verfügbarkeit sind aktuell nicht bekannt und es scheint schwierig, diese zu ermitteln, solange AV noch nicht marktgängig verfügbar sind.

Das Fahrverhalten automatisierter Fahrzeuge und deren Einfluss auf den Verkehrsablauf sind schon bereits ein Schwerpunkt in vergangenen Forschungsarbeiten gewesen. Damit dieser Einfluss nicht ausschließlich von Annahmen abhängig, ist es essenziell, mehr Daten aus Feldversuchen mit AV-Prototypen zu sammeln, um damit Fahrverhaltensmodelle verbessern zu können. Mit diesen können schließlich Simulationen durchgeführt werden, um unterschiedliche Fragestellungen zum Einfluss von AV auf den Verkehrsablauf zu beantworten. Es wird jedoch immer Unsicherheiten geben, wenn es um die Vorhersage des Fahrverhaltens von automatisierten Fahrzeugen geht, die noch nicht die Serienreife erreicht haben.

Die Wahrnehmung der Fahrtzeit in automatisierten Fahrzeugen spielt für Prognosen der Verkehrsnachfrage eine große Rolle. Es ist daher wichtig, dass solche wahrnehmungsbezogenen Effekte in Befragungen identifiziert und quantifiziert werden. Im Idealfall können Einflüsse von Fahrdauer, Fahrtzweck, Personengruppe oder gar Fahrtrichtung auf die Empfindung der automatisierten Fahrtzeit unterschieden werden.

Eine offensichtliche Einschränkung für solche Befragungen ist, dass Personen bisher nur Nutzungspräferenzen angeben, ohne jemals entsprechende Erfahrungen mit AV in der Realität gesammelt zu haben. Neue Fahrzeugmodelle erhalten mehr und mehr automatisierte Fahrfunktionen. Die Menschen können sich dann zukünftig besser vorstellen, welche Vorteile es für sie hat, in verschiedenen Situationen nicht selbst fahren zu müssen.

Es wird aber auch weiterhin Wahrnehmungsfaktoren geben, die sich empirisch nur schwer fassen und in Modellen berücksichtigen lassen. Dazu gehören beispielsweise die Fahrfreude oder der Wunsch oder die Ablehnung, die Fahraufgabe abzugeben. Nichtsdestotrotz sind die Erkenntnisse über das Mobilitätsverhalten aus Befragungen entscheidend dafür, um mit Verkehrsnachfragemodellen aussagekräftige und robuste Ergebnisse produzieren zu können.

8 Literatur

- ADAC (2021): *Automatisiertes Fahren mit Staupilot: Freihändig in der S-Klasse* [online]. ADAC (Hg.)2021. Zugriff am: 20. Oktober 2021. Verfügbar unter: www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/technik-vernetzung/autonomes-fahren-staupilot-s-klasse/
- ADEBISI, A., LIU, Y., SCHROEDER, B., MA, J., CESME, B., ET AL. (2020): *Developing Highway Capacity Manual Capacity Adjustment Factors for Connected and Automated Traffic on Freeway Segments*. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. S. 036119812093479. Verfügbar unter: doi:10.1177/0361198120934797
- ASGARI, H., JIN, X. (2019): *Incorporating Attitudinal Factors to Examine Adoption of and Willingness to Pay for Autonomous Vehicles*. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2673 (8). S. 418-429. Verfügbar unter: doi:10.1177/0361198119839987
- ASGHARZADEH, M., KONDYLI, A. (2018): *Comparison of Highway Capacity Estimation Methods*. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2672 (15). S. 75-84. Verfügbar unter: doi:10.1177/0361198118777602
- AULD, J., SOKOLOV, V., STEPHENS, T.S. (2017): *Analysis of the Effects of Connected-Automated Vehicle Technologies on Travel Demand*. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2625. S. 1-8.
- AXHAUSEN, K.W., SAMMER, G. (2001): *"stated responses": Überblick, Grenzen, Möglichkeiten*. Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (Hg.). ETH Zürich. In: Arbeitsbericht Verkehrs- und Raumplanung, Nr. 73. Zugriff am: 13. September 2021. Verfügbar unter: www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/66015
- BANSAL, P., KOCKELMAN, K.M. (2018): *Are we ready to embrace connected and self-driving vehicles? A case study of Texans*. In: Transportation, 45 (2). S. 641-675. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11116-016-9745-z
- BAR-GERA, H. (1999): *Origin-Based Algorithms for Transportation Network Modeling* [Online]. USA. ISBN 0599580402. Verfügbar unter: dl.acm.org/doi/book/10.5555/930426
- BAR-GERA, H. (2002): *Origin-Based Algorithm for the Traffic Assignment Problem*. In: Transportation Science, 36 (4). S. 398-417. Verfügbar unter: doi:10.1287/trsc.36.4.398.549
- BAST (2021): *Digitale Testfelder und Erprobungsvorhaben* [online]. BAST (Hg.). Zugriff am: 4. November 2021. Verfügbar unter: www.testfeldmonitor.de/
- BATES, J. (2007): *History of Demand Modelling*. In: Handbook of Transport Modelling. Second Edition. 1. EMERALD GROUP PUBLISHING LIMITED (Hg.). Amsterdam: Elsevier, S. 11-34. 10.1108/hit. ISBN 978-0-08-045376-7.
- BECKER, F., AXHAUSEN, K.W. (2017): *Literature review on surveys investigating the acceptance of automated vehicles*. In: Transportation, 44 (6). S. 1293-1306. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11116-017-9808-9
- BMVI (2015): *Bericht zum Forschungsbedarf - Runder Tisch Automatisiertes Fahren - AG Forschung*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.).

- BMVI (2017): *Automatisiertes und Vernetztes Fahren* [online] - Bericht der Ethik-Kommission. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.). Zugriff am: 29. Dezember 2021. Verfügbar unter: www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/bericht-der-ethik-kommission.html
- BOYCE, D., RALEVIC-DEKIC, B., BAR-GERA, H. (2004): *Convergence of Traffic Assignments: How Much is Enough?* In: Journal of Transportation Engineering, 130 (1). S. 49-55. Verfügbar unter: doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:1(49)
- BOYCE, D.E., WILLIAMS, H.C. (2015): *Forecasting Urban Travel - Past, Present and Future* [Online]. Cheltenham: Edward Elgar Publishing. ISBN 9781784713591. Zugriff am: 29. Dezember 2021. Verfügbar unter: www.elgaronline.com/view/9781848449602.xml
- BRILON, W., GEISTEFELDT, J. (2010): *Überprüfung der Bemessungswerte des HBS für Autobahnabschnitte außerhalb der Knotenpunkte - Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 21.049/2007 des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. 1033. ISBN 9783865099914.
- BRILON, W., GEISTEFELDT, J., REGLER, M. (2005). Reliability of Freeway Traffic Flow: A Stochastic Concept of Capacity [online]. In: Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory. S. 125-144. Zugriff am: 29. Dezember 2021. Verfügbar unter: https://www.safetylit.org/citations/index.php?fuseaction=citations.viewdetails&citationIds=citjournalarticle_241752_38
- BUNDESTAG (2017): *Achtes Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes (20.06.2017)* [Online]. Zugriff am: 22. September 2021. Verfügbar unter: www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl117s1648.pdf
- BUNDESTAG (2021): *Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes - Gesetz zum autonomen Fahren (27.07.2021)* [Online]. Zugriff am: 21. September 2021. Verfügbar unter: www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl121s3108.pdf
- BUREAU OF PUBLIC ROADS (1964): *Traffic Assignment Manual - for application with a large, high speed computer*. Washington D.C.
- CALVERT, S.C., SCHAKEL, W.J., VAN LINT, J.W.C. (2017): *Will Automated Vehicles Negatively Impact Traffic Flow?* In: Journal of Advanced Transportation. S. 1-17. Verfügbar unter: doi:10.1155/2017/3082781
- CASCETTA, E. (2001): *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods*. Boston: Springer. In: Applied Optimization. 49. ISBN 9781475768732.
- CASCETTA, E. (2009): *Transportation Systems Analysis - Models and Applications*. 2. Auflage: Springer-Verlag. In: Optimization and Its Applications, 29. ISBN 0387758569.
- CHILDRESS, S., NICHOLS, B., CHARLTON, B., COE, S. (2015): *Using an Activity-Based Model to Explore the Potential Impacts of Automated Vehicles*. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2493). S. 99-106. Verfügbar unter: doi:10.3141/2493-11
- CORREIA, G.H.D.A., LOOFF, E., VAN CRANENBURGH, S., SNELDER, M., VAN AREM, B. (2019): *On the impact of vehicle automation on the value of travel time while performing work and leisure activities in a car: Theoretical insights and results from a stated preference survey*. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice, 119. S. 359-382. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tra.2018.11.016

- CYGANSKI, R., FRAEDRICH, E., LENZ, B. (2015): *Travel-time valuation for automated driving: A use-case-driven study* [Online]. In: Proceedings of the 94th Annual Meeting of the TRB. Zugriff am: 29. Dezember 2021. Verfügbar unter: elib.dlr.de/95260/
- CZARNECKI, K. (2018): *Operational Design Domain for Automated Driving Systems - Taxonomy of Basic Terms*. DOI: 10.13140/RG.2.2.18037.88803. Waterloo Intelligent Systems Engineering (WISE) Lab (Hg.). University of Waterloo, Canada.
- DALY, A., HESS, S. (2020): *VTT or VTTS: a note on terminology for value of travel time work*. In: *Transportation*, 47 (3). S. 1359-1364. Verfügbar unter: [doi:10.1007/s11116-018-9966-4](https://doi.org/10.1007/s11116-018-9966-4)
- DELIS, A.I., NIKOLOS, I.K., PAPAGEORGIOU, M. (2018): *A Macroscopic Multi-Lane Traffic Flow Model for ACC/CACC Traffic Dynamics*. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672 (20). S. 178-192. Verfügbar unter: [doi:10.1177/0361198118786823](https://doi.org/10.1177/0361198118786823)
- DER SPIEGEL (2021): *Mercedes-Benz erhält erste Genehmigung für autonome Fahrfunktion* [online] - *Filme schauen am Steuer möglich*. DER SPIEGEL (Hg.). Zugriff am: 27. Dezember 2021. Verfügbar unter: www.spiegel.de/auto/mercedes-benz-erhaelt-erste-genehmigung-fuer-autonome-fahrfunktion-a-773d17bf-3f3a-4757-9ff8-1bd6a5416721
- DIAS, F.F., NAIR, G.S., RUÍZ-JURI, N., BHAT, C.R., MIRZAEI, A. (2020): *Incorporating Autonomous Vehicles in the Traditional Four-Step Model*. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2674 (7). S. 348-360. Verfügbar unter: [doi:10.1177/0361198120922544](https://doi.org/10.1177/0361198120922544)
- ELEFTERIADOU, L., TORBIC, D., WEBSTER, N. (1997): *Development of Passenger Car Equivalents for Freeways, Two-Lane Highways, and Arterials*. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1572 (1). S. 51-58. Verfügbar unter: [doi:10.3141/1572-07](https://doi.org/10.3141/1572-07)
- ERTRAC (2019): *Connected Automated Driving Roadmap* [online]. Zugriff am: 11. Februar 2021. Verfügbar unter: www.ertrac.org/uploads/documentssearch/id57/ERTRAC-CAD-Roadmap-2019.pdf
- FAGNANT, D.J., KOCKELMAN, K. (2015): *Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations*. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77. S. 167-181. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.tra.2015.04.003](https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003)
- FGSV (2005a): *Hinweise zum Fundamentaldiagramm - Grundlagen und Anwendungen*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.), Nr. FGSV 385. Köln.
- FGSV (2005b): *Hinweise zum induzierten Verkehr*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.). Arbeitsgruppe Verkehrsplanung. In: *W 1*, Nr. FGSV 141. Köln.
- FGSV (2008): *Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.). In: *FGSV R1 - Regelwerke*, Nr. FGSV 121. Köln.
- FGSV (2015): *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen - HBS 2015*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.). In: *FGSV W1 - Wissensdokumente*, Nr. FGSV 299 B. Ausg. 2015, Stand: 18.9.2015. Köln.
- FGSV (2020a): *Begriffsbestimmungen für das Straßen- und Verkehrswesen*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.). In: *FGSV-Schriftenreihen*, Nr. FGSV 005/1. Köln.

- FGSV (2020b): *Chancen und Risiken des autonomen und vernetzten Fahrens aus der Sicht der Verkehrsplanung*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.). Arbeitsgruppe Verkehrsplanung. Köln.
- FLÜGEL, S., HALSE, A.H., HULLEBERG, N., JORDBAKKE, G.N. (2019): *Estimating the effect of vehicle automation on car drivers' and car passengers' valuation of travel time savings*. Institute of Transport Economics, Norwegian Centre for Transport Research, Oslo.
- FRIEDRICH, B. (2015): *Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge*. In: *Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. M. Maurer, J.C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner (Hg.). Berlin: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, S. 331-350. 10.1007/978-3-662-45854-9. ISBN 978-3-662-45853-2.
- FRIEDRICH, B., BENNECKE, A., FRIEDRICH, M., LOHMILLER, J. (2015): *Zeitabhängige Bewertung der Verbindungsqualität und der Zuverlässigkeit in Straßennetzen - Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 18.0019/2007*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hg.). In: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Nr. 1118. Verfügbar unter: www.schuenemann-verlag.de/fachverlag-nw/zeitabhaengige-bewertung-der-verbindungsqualitaet-und-der-zuverlaessigkeit-in-strassennetzen.html
- FRIEDRICH, M. (2020): *Verkehrsplanung und Verkehrsmodelle - Skript zur Vorlesung WS2020/2021*. Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik (Hg.). Institut für Straßen- und Verkehrswesen. Universität Stuttgart.
- FRIEDRICH, M., PESTEL, E., SCHILLER, C., SIMON, R., HEIDL, U., ET AL. (2019a): *Anforderungen an städtische Verkehrsnachfragemodelle - FE-Projekt 70.893/2014*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.).
- FRIEDRICH, M., SONNLEITNER, J., RICHTER, E. (2019b): *Integrating automated vehicles into macroscopic travel demand models*. In: *Transportation Research Procedia*, 41. S. 360-375. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.trpro.2019.09.060](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.09.060)
- GENTILE, G., NOEKEL, K. (2009). *Linear User Cost Equilibrium: The New Algorithm for Traffic Assignment in VISUM* [online]. In: *Proceedings of European Transport Conference 2009*. Zugriff am: 30. Juni 2021. Verfügbar unter: <https://trid.trb.org/view/1107482>; https://www.researchgate.net/publication/228425160_Linear_User_Cost_Equilibrium_the_new_algorithm_for_traffic_assignment_in_VISUM
- GKARTZONIKAS, C., GKRTZA, K. (2019): *What have we learned? A review of stated preference and choice studies on autonomous vehicles*. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 98. S. 323-337. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.trc.2018.12.003](https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.12.003)
- GORA, P., KATRAKAZAS, C., DRABICKI, A., ISLAM, F., OSTASZEWSKI, P. (2020): *Microscopic traffic simulation models for connected and automated vehicles (CAVs) – state-of-the-art*. In: *Procedia Computer Science*, 170. S. 474-481. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.procs.2020.03.091](https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.091)
- GREENSHIELDS, B.D., BIBBINS, J.R., CHANNING, W.S., MILLER, H.H. (1935): *A study of traffic capacity*. In: *Highway Research Board proceedings*, (14). S. 448-477.
- GREENSHIELDS, B.D., SCHAPIRO, D., ERICKSEN, E.L. (1947): *Traffic performance at urban street intersections - Technical Report No. 1*. Bureau of Highway Traffic, Yale University. New Haven, Connecticut. Verfügbar unter: trid.trb.org/view/117305
- GUCWA, M. (2014): *Mobility and Energy Impacts of Automated Cars*. Vortrag vom 17.06.2014. In: *Proceedings of the automated vehicles symposium*. San Francisco.

- GUNN, H.F., SILLAPARCHARN, P. (2007): *An Introduction to the Valuation of Travel Time-Savings and Losses*. In: Handbook of Transport Modelling. Second Edition. EMERALD GROUP PUBLISHING LIMITED (Hg.). Amsterdam: Elsevier, S. 503-517. 10.1108/hit. ISBN 978-0-08-045376-7.
- HAAN, P. de, PETERS, A., SEMMLING, E., MARTH, H., KAHLENBORN, W. (2015): *Rebound-Effekte: Ihre Bedeutung für die Umweltpolitik* [online]. Umweltbundesamt (Hg.). Zugriff am: 10. August 2021. Verfügbar unter: www.umweltbundesamt.de/publikationen/rebound-effekte-ihre-bedeutung-fuer-die
- HARTLEB, J., FRIEDRICH, M., RICHTER, E. (2021): *Vehicle scheduling for on-demand vehicle fleets in macroscopic travel demand models*. In: Transportation. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11116-021-10205-4
- HIGHWAY RESEARCH BOARD (1965): *Special Report 87: Highway Capacity Manual*. Highway Research Board (Hg.). National Research Council, Nr. 87. Washington, D.C. Verfügbar unter: trid.trb.org/view.aspx?id=90613
- HÖRL, S., BECKER, F., DUBERNET, T., AXHAUSEN, K.W. (2019): *Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung - Forschungsprojekt SVI 2016/001*.
- HYMEL, K.M., SMALL, K.A., VAN DENDER, K. (2010): *Induced demand and rebound effects in road transport*. In: Transportation Research Part B: Methodological, 44 (10). S. 1220-1241. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.trb.2010.02.007
- KIM, K., ROUSSEAU, G., FREEDMAN, J., NICHOLSON, J. (2015): *The Travel Impact of Autonomous Vehicles in Metro Atlanta through Activity-Based Modeling*. Vortrag am 18.05.2015. 15th TRB National Transportation Planning Applications Conference.
- KIMBER, R.M., McDONALD, M., HOUNSELL, N. (1985): *Passenger car units in saturation flows: Concept, definition, derivation*. In: Transportation Research Part B: Methodological, 19 (1). S. 39-61. Verfügbar unter: doi:10.1016/0191-2615(85)90028-1
- KIMBER, R.M., SEMMENS, M.C., SHEWEY, P. (1982): *Saturation flows at traffic signal junctions: Studies on test track and public roads*. Proc. Int. Conf. Road Traffic (Hg.). Institute of Electrical Engineers. London.
- KLEIN, T.A., ALTENBURG, S. (2019): *Autonomes Fahren - steuern oder überrollt werden?* In: Straßenverkehrstechnik, (3). S. 166-174.
- KOLAROVA, V., CYGANSKI, R., LENZ, B. (2019a): *Activities while travelling? Travel time perception and travel time use in an era of automated driving*. In: Evolving impact of ICT on activities and travel behaviour: ELSEVIER ACADEMIC Press, S. 171-206. ISBN 9780128162132.
- KOLAROVA, V., STECK, F. (2020): *Estimating impact of autonomous driving on value of travel time savings for long-distance trips using revealed and stated preference methods*. In: Mapping the travel behavior genome. K.G. Goulias und A.W. Davis (Hg.): Elsevier, S. 561-575. 10.1016/C2018-0-02132-5. ISBN 9780128173404.
- KOLAROVA, V., STECK, F., BAHAMONDE-BIRKE, F.J. (2019b): *Assessing the effect of autonomous driving on value of travel time savings: A comparison between current and future preferences*. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice, 129. S. 155-169. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tra.2019.08.011
- KOOPMAN, P., FRATRIK, F. (2019): *How Many Operational Design Domains, Objects, and Events?* [online]. Zugriff am: 29. Dezember 2021. Verfügbar unter: users.ece.cmu.edu/~koopman/pubs/Koopman19_SAFE_AI_ODD_OEDR.pdf

- KRAIL, M., HELLEKES, J., SCHNEIDER, U., DÜTSCHKE, E., SCHELLERT, M., ET AL. (2019): *Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Hg.). Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Zugriff am: 29. Dezember 2021. Verfügbar unter: www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/energie-treibhausgaswirkungen-vernetztes-fahren.pdf?__blob=publicationFile
- KRAUSE, S., MOTAMEDIDEHKORDI, N., HOFFMANN, S., BUSCH, F., HARTMANN, M., ET AL. (2017): *Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur*. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V (Hg.). In: Schriftenreihe, Nr. 296.
- KRÖGER, L., KUHNIMHOF, T., TROMMER, S. (2019): *Does context matter? A comparative study modelling autonomous vehicle impact on travel behaviour for Germany and the USA*. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 122. S. 146-161. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.tra.2018.03.033](https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.03.033)
- LAMONDIA, J.J., FAGNANT, D.J., QU, H., BARRETT, J., KOCKELMAN, K. (2016): *Shifts in Long-Distance Travel Mode Due to Automated Vehicles: Statewide Mode-Shift Simulation Experiment and Travel Survey Analysis*. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2566 (1). S. 1-11. Verfügbar unter: [doi:10.3141/2566-01](https://doi.org/10.3141/2566-01)
- LAVASANI, M., JIN, X., DU, Y. (2016): *Market Penetration Model for Autonomous Vehicles on the Basis of Earlier Technology Adoption Experience*. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2597 (1). S. 67-74. Verfügbar unter: [doi:10.3141/2597-09](https://doi.org/10.3141/2597-09)
- LE VINE, S., ZOLFAGHARI, A., POLAK, J. (2015): *Autonomous cars - The tension between occupant experience and intersection capacity*. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 52. S. 1-14. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.trc.2015.01.002](https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.01.002)
- LEGÈNE, M.F., AUPING, W.L., CORREIA, G.H.D.A., VAN AREM, B. (2020): *Spatial impact of automated driving in urban areas*. In: *Journal of Simulation*. S. 1-9. Verfügbar unter: [doi:10.1080/17477778.2020.1806747](https://doi.org/10.1080/17477778.2020.1806747)
- LEVIN, M.W., BOYLES, S.D. (2015): *Effects of Autonomous Vehicle Ownership on Trip, Mode, and Route Choice*. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2493). S. 29-38. Verfügbar unter: [doi:10.3141/2493-04](https://doi.org/10.3141/2493-04)
- LITMAN, T. (2021a): *Generated Traffic and Induced Travel: Implications for Transport Planning*. Victoria Transport Policy Institute. Zugriff am: 29. Dezember 2021. Verfügbar unter: www.vtpi.org/gentraf.pdf
- LITMAN, T.A. (2021b): *Autonomous Vehicle Implementation Predictions - Implications for Transport Planning*. Victoria Transport Policy Institute (Hg.). Zugriff am: 29. Dezember 2021. Verfügbar unter: www.vtpi.org/avip.pdf
- LOHMILLER, J. (2014): *Qualität des Verkehrsablaufs auf Netzabschnitten von Autobahnen - Bewertung unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit und Analyse von Einflussfaktoren* [Online]. Stuttgart. In: Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen. 50. ISBN 9783981675405. Zugriff am: 29. Dezember 2021. Verfügbar unter: nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-96577
- LOHMILLER, J., SUKENNIK, P., FRIEDRICH, M., SONNLEITNER, J. (2020): *Assumptions on Macroscopic Modelling - CoEXIST Milestone MS16*. In: AV-ready macroscopic modelling tool. CoEXIST Deliverable D2.7. COEXIST (Hg.).

- LOHSE, D., SCHNABEL, W. (2011a): *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung - Band 1 - Straßenverkehrstechnik*. 3. Auflage. Berlin: Beuth Verlag GmbH. In: Beuth Studium. ISBN 3410172718.
- LOHSE, D., SCHNABEL, W. (2011b): *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung - Band 2 - Verkehrsplanung*. 3. Auflage. Berlin: Beuth Verlag GmbH. In: Beuth Studium. ISBN 3410172726.
- LOOFF, E. de, CORREIA, G.H.D.A., VAN CRANENBURGH, S., SNELDER, M., VAN AREM, B. (2018): *Potential Changes in Value of Travel Time as a Result of Vehicle Automation: a Case Study in the Netherlands*. In: Proceedings of the 97th Annual Meeting of the TRB. ISBN 18-03109.
- LORENZ, M., ELEFTERIADOU, L. (2000): *A probabilistic approach to defining freeway capacity and breakdown*. Transportation Research Board. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity. Maui Hawaii.
- LYONS, G., JAIN, J., HOLLEY, D. (2007): *The use of travel time by rail passengers in Great Britain*. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice, 41 (1). S. 107-120. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tra.2006.05.012
- MARCOTTE, P., WYNTER, L. (2004): *A New Look at the Multiclass Network Equilibrium Problem*. In: Transportation Science, 38 (3). S. 282-292. Verfügbar unter: doi:10.1287/trsc.1030.0039
- Maurer, M., et al. (Hg.) (2015): *Autonomes Fahren - Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg. Berlin. ISBN 978-3-662-45853-2.
- MILAKIS, D., VAN AREM, B., VAN WEE, B. (2017): *Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research*. In: Journal of Intelligent Transportation Systems, 21 (4). S. 324-348. Verfügbar unter: doi:10.1080/15472450.2017.1291351
- MINDERHOUD, M.M., BOTMA, H., BOVY, P.H.L. (1996): *An Assessment of Roadway Capacity Estimation Methods*. Delft University of Technology (Hg.). Faculty of Civil Engineering, Department of Infrastructure, Transportation and Traffic Engineering Section, Nr. VK 2201.302. Delft. Verfügbar unter: journals.sagepub.com/doi/10.3141/1572-08
- MOECKEL, R., DONNELLY, R., Ji, J. (2019): *Statewide Transportation Models in the U.S.: A Review of the State of Practice*. In: Transportation Research Board 98th Annual Meeting.
- NARAYANAN, S., CHANIOTAKIS, E., ANTONIOU, C. (2020): *Shared autonomous vehicle services: A comprehensive review*. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 111. S. 255-293. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.trc.2019.12.008
- NEUHOLD, R. (2018): *Ermittlung von Kapazitätsbeschränkungsfunktionen anhand empirischer Verkehrsdaten*. Dissertation. Technische Universität Graz.
- OECD (2018): *Safer Roads with Automated Vehicles? - Corporate Partnership Board Report*. OECD (Hg.). International Transport Forum.
- OLSTAM, J., JOHANSSON, F. (2019): *Scenario specifications for eight use cases - CoExist Deliverable D1.4*. CoExist (Hg.). Zugriff am: 15. November 2021. Verfügbar unter: www.h2020-coexist.eu/wp-content/uploads/2019/10/D1.4-Scenario-specification-for-eight-use-cases-.pdf

- On-Road Automated Driving (ORAD) committee, Nr. J3016:2021, *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International. Zugriff am: 22. September 2021. Verfügbar unter: www.sae.org/standards/content/j3016_202104/
- ORTÚZAR, J.D.D., WILLUMSEN, L.G. (2011): *Modelling transport*. Fourth edition. Chichester: Wiley. ISBN 9781119993308.
- PERNESTÅL, A., KRISTOFFERSSON, I. (2018). Effects of driverless vehicles: A review of simulations [online]. In: Working papers in Transport Economics, (11). Zugriff am: 29. Dezember 2021. Verfügbar unter: ideas.repec.org/p/hhs/ctswps/2018_011.html#download
- PETER, L., JANKO, J., SCHICK, N., WAßMUTH, V., FRIEDRICH, M., ET AL. (2021): *Entwicklung eines aktuellen, echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz - Development of an up-to-date, real-time available Key Performance Indicator (KPI) system for the German motorway network*. Bundesanstalt für Straßenwesen (Hg.). In: Forschungsprogramm Straßenwesen FE 21.0059/2017. Zugriff am: 18. Oktober 2021. Verfügbar unter: www.bast.de/BAST_2017/DE/Publikationen/Berichte/unterreihe-v/2022-2021/v342.html
- PINKOFSKY, L. (2006): *Typisierung von Ganglinien der Verkehrsstärke und ihre Eignung zur Modellierung der Verkehrsnachfrage*. Dissertation. Technische Universität Braunschweig.
- PTV (2011): *Verkehrsmodellierung für die Region Stuttgart - Analyseverkehr 2009/2010*. Schlussbericht. Verband Region Stuttgart (Hg.).
- PTV (2020): *PTV VISUM 2020 - Handbuch*. PTV Group (Hg.).
- RICHTER, E., FRIEDRICH, M., MIGL, A., HARTLEB, J. (2019): *Integrating ridesharing services with automated vehicles into macroscopic travel demand models*. In: 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS). 6/5/2019 - 6/7/2019: IEEE, S. 1-8. ISBN 978-1-5386-9484-8.
- RÖSENER, C., SAUERBIER, J., ZLOCKI, A., ECKSTEIN, L., HENNECKE, F., ET AL. (2019): *Potenzieller gesellschaftlicher Nutzen durch zunehmende Fahrzeugautomatisierung - Potential societal benefits by increasing vehicle automation*. Bremen: Fachverlag NW in Carl Schünemann Verlag. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Fahrzeugtechnik, F. ISBN 3956064356.
- SHLADOVER, S.E., SU, D., LU, X.-Y. (2012): *Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow*. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2324). S. 63-70. Verfügbar unter: doi:10.3141/2324-08
- SONNLEITNER, J., FRIEDRICH, M. (2020a): *AV-ready macroscopic modelling tool - CoEXist Deliverable D2.7*. CoEXist (Hg.). Zugriff am: 15. November 2021. Verfügbar unter: www.h2020-coexist.eu/wp-content/uploads/2018/11/D2.7-AV-ready-macroscopic-modelling-tool.pdf
- SONNLEITNER, J., FRIEDRICH, M. (2020b): *Guide for the simulation of AVs with a macroscopic modelling tool - CoEXist Deliverable D2.8*. CoEXist (Hg.). Zugriff am: 17. November 2021. Verfügbar unter: www.h2020-coexist.eu/wp-content/uploads/2020/04/D2.8_Guide_for_the_simulation_of_AVs_with_macroscopic_modelling_tool_V05.pdf
- SONNLEITNER, J., FRIEDRICH, M., RICHTER, E. (2021): *Impacts of highly automated vehicles on travel demand: macroscopic modeling methods and some results*. In: Transportation. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11116-021-10199-z

- SORRELL, S. (2007): *The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency - A report produced by the Sussex Energy Group for the Technology and Policy Assessment function of the UK Energy Research Centre*. UK Energy Research Centre (Hg.), Nr. ISBN 1-903144-0-35. Zugriff am: 11. August 2021. Verfügbar unter: ukerc.rl.ac.uk/UCAT/PUBLICATIONS/The_Rebound_Effect_An_Assessment_of_the_Evidence_for_Economy-wide_Energy_Savings_from_Improved_Energy_Efficiency.pdf
- SOTEROPOULOS, A., BERGER, M., CIARI, F. (2019): *Impacts of automated vehicles on travel behaviour and land use: an international review of modelling studies*. In: *Transport Reviews*, (39). S. 29-49. Verfügbar unter: [doi:10.1080/01441647.2018.1523253](https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1523253)
- SPIESS, H. (1990): *Conical Volume-Delay Functions - Technical Note*. In: *Transportation Science*, 24 (2). S. 153-158. Verfügbar unter: [doi:10.1287/trsc.24.2.153](https://doi.org/10.1287/trsc.24.2.153)
- STECK, F., KOLAROVA, V., BAHAMONDE-BIRKE, F., TROMMER, S., LENZ, B. (2018): *How Autonomous Driving May Affect the Value of Travel Time Savings for Commuting*. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672 (46). S. 11-20. Verfügbar unter: [doi:10.1177/0361198118757980](https://doi.org/10.1177/0361198118757980)
- STERN, R.E., CUI, S., DELLE MONACHE, M.L., BHADANI, R., BUNTING, M., ET AL. (2018): *Dissipation of stop-and-go waves via control of autonomous vehicles: Field experiments*. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89. S. 205-221. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.trc.2018.02.005](https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.02.005)
- SUKENNIK, P. (2018): *PTV Vissim extension - new features and improvements - CoExist Deliverable D2.4*. CoExist (Hg.). Zugriff am: 15. November 2021. Verfügbar unter: www.h2020-coexist.eu/wp-content/uploads/2018/10/D2.4-Vissim-extension-new-features-and-improvements_final.pdf
- SUKENNIK, P., KAUTZSCH, L. (2019): *Default behavioural parameter sets for Automated Vehicles - CoExist Deliverable D2.3*. CoExist (Hg.). Zugriff am: 15. November 2021. Verfügbar unter: www.h2020-coexist.eu/wp-content/uploads/2018/10/D2.3-default-behavioural-parameter-sets_final.pdf
- SUKENNIK, P., KAUTZSCH, L., FLÉCHON, C. (2019): *Micro-simulation guide for automated vehicles - CoExist Deliverable D2.5*. CoExist (Hg.). Zugriff am: 15. November 2021. Verfügbar unter: www.h2020-coexist.eu/wp-content/uploads/2018/11/D2.5-Micro-simulation-guide-for-automated-vehicles.pdf
- SUKENNIK, P., ZEIDLER, V., VAN ET TEN, J. (2018): *Technical report on data collection and validation - CoExist Deliverable D2.6*. CoExist (Hg.). Zugriff am: 15. November 2021. Verfügbar unter: www.h2020-coexist.eu/wp-content/uploads/2018/10/D2.6-Technical-report-on-data-collection-and-validation-process_FINAL.pdf
- TIENTRAKOOL, P., HO, Y.-C., MAXEMCHUK, N.F. (2011): *Highway Capacity Benefits from Using Vehicle-to-Vehicle Communication and Sensors for Collision Avoidance*. In: *2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall 2011)*. San Francisco, California, USA, 5 - 8 September 2011. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1-5. ISBN 978-1-4244-8327-3.
- TRB (2010): *Highway capacity manual*. Washington DC: TRB Business Office. ISBN 978-0-309-16077-3.
- TREIBER, M., KESTING, A. (2010): *Verkehrsdynamik und -simulation - Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Berlin: Springer. In: *Springer-Lehrbuch*. ISBN 978-3-642-05227-9.
- UNECE (2021): *UN Regulation No. 157 (22.01.2021)* [Online]. Zugriff am: 20. Oktober 2021. Verfügbar unter: unece.org/transport/documents/2021/03/standards/un-regulation-no-157-automated-lane-keeping-systems-alks

- VAN AERDE, M.W. (1995): *A Single Regime Speed-Flow-Density Relationship for Congested and Uncongested Highways*. Transportation Research Board. In: Presented at the 74th TRB Annual Meeting, Nr. Paper No. 950802. Washington, D.C.
- VAN AREM, B., VAN DRIEL, C.J.G., VISSER, R. (2006): *The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics*. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 7 (4). S. 429-436. Verfügbar unter: doi:10.1109/TITS.2006.884615
- WADUD, Z., HUDA, F.Y. (2019): *Fully automated vehicles: the use of travel time and its association with intention to use*. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport. S. 1-15. Verfügbar unter: doi:10.1680/jtran.18.00134
- WAGNER, P. (2015): *Steuerung und Management in einem Verkehrssystem mit autonomen Fahrzeugen*. In: Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. M. Maurer, J.C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner (Hg.). Berlin: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, S. 313-330. 10.1007/978-3-662-45854-9. ISBN 978-3-662-45853-2.
- WAGNER, P. (2017). *Autonomer Verkehr und die Kapazität von Straßen* [online]. In: FSV Schriftenreihe, Heft Nr. 017 Automatisiertes Fahren. Verfügbar unter: www.fsv.at/shop/produktdetail.aspx?IDProdukt=e3de7299-e8a8-4bf8-9c75-d5449d3f77d6
- WARDMAN, M., CHINTAKAYALA, V.P.K., JONG, G. de (2016): *Values of travel time in Europe: Review and meta-analysis*. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice, 94. S. 93-111. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tra.2016.08.019
- WARDROP, J.G. (1952): *Some Theoretical Aspects Of Road Traffic Research - Road Paper No. 36*. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1 (3). S. 325-362. Verfügbar unter: doi:10.1680/ipeds.1952.11259
- WINKLE, T. (2015): *Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge: Erkenntnisse aus der Unfallforschung*. In: Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. M. Maurer, J.C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner (Hg.). Berlin: Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, S. 351-376. 10.1007/978-3-662-45854-9. ISBN 978-3-662-45853-2.
- YOOK, D. (2014). *Models and Solution Algorithms for Asymmetric Traffic and Transit Assignment Problems* [online]. In: All Graduate Theses and Dissertations, (3102). Zugriff am: 26. August 2021. Verfügbar unter: digitalcommons.usu.edu/etd/3102
- YU, H., JIANG, R., HE, Z., ZHENG, Z., LI, L., ET AL. (2021): *Automated vehicle-involved traffic flow studies: A survey of assumptions, models, speculations, and perspectives*. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 127. S. 103101. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.trc.2021.103101
- ZAHAVI, Y. (1979): *The UMOOT Project - A report prepared for the U.S. Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, and the Federal Republic of Germany Ministry of Transport*. National Technical Information Service (Hg.), Nr. DOT-RSPA-DPB-20-79-3. Springfield, Virginia.
- ZHANG, W., GUHATHAKURTA, S., KHALIL, E.B. (2018): *The impact of private autonomous vehicles on vehicle ownership and unoccupied VMT generation*. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 90. S. 156-165. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.trc.2018.03.005

9 Abkürzungsverzeichnis

ACC	Adaptive Cruise Control
ADS	Automated Driving System
ANPR	Automatic Number Plate Recognition
AV	Automatisierte Fahrzeuge (Automated Vehicles) (auch Singular)
Base	Basisszenario, Prognose-Nullfall, Bezugsszenario 2025
BPR	Bureau of Public Roads
BWS	Brick-Wall-Stop
CACC	Cooperative Adaptive Cruise Control
CR	Capacity-Restraint
CV	Konventionelle Fahrzeuge (Conventional Vehicles) (auch Singular)
DUE	Deterministic User Equilibrium
DUN	Deterministic Uncongested Network
Esta	Gruppe Established (Etablierung)
EU	Europäische Union
FCD	Floating-Car-Daten
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FPD	Floating-Phone-Daten
FSD	Floating-Smartphone-Daten
FW	Fahrtweite
FZ	Fahrtzeit
Fzg	Fahrzeug
FzgKm	Fahrzeugkilometer
FzgStd	Fahrzeugstunden
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
Intr	Gruppe Introductory (Einführung)
IV	Individualverkehr
KGM	Kenngrößenmatrix, Kenngrößenmatrizen
Lkw	Lastkraftwagen
LSA	Lichtsignalanlagen
LUCE	Linear User Cost Equilibrium

MIV	Motorisierter Individualverkehr
MSA	Method of Successive Averages
MSA-FA	Method of Successive Averages – Flow Averaging
n. a.	nicht automatisiert
ODD	Operational Design Domain
ÖV	Öffentlicher Verkehr
Orig	Gruppe Original (mit Grenzwert für Zeitwahrnehmung von 10 min)
Orig-t0	Gruppe Original mit Grenzwert für Zeitwahrnehmung von 0 min
Orig-t5	Gruppe Original mit Grenzwert für Zeitwahrnehmung von 5 min
PCE	Passenger Car Equivalents
PCU	Passenger Car Units
PE	Pkw-Einheiten
Pkw	Personenkraftwagen
Prev	Gruppe Prevalent (Dominanz)
Pr-Ex	Gruppe Prevalent-Extreme
q95	Verkehrsstärke des 95. Perzentils
q99	Verkehrsstärke des 99. Perzentils
red-15	Automatisierte Fahrtzeit über Grenzwert wird um 15 % reduziert
red-30	Automatisierte Fahrtzeit über Grenzwert wird um 30 % reduziert
RIN	Richtlinien für integrierte Netzgestaltung
SAE	Society of Automotive Engineers
SAV	Shared Automated Vehicles
SUE	Stochastic User Equilibrium
SUN	Stochastic Uncongested Network
VFS	Verbindungsfunktionsstufe, Verbindungsfunktionsstufen
VRS	Verband Region Stuttgart
VISEM	Verkehr-in-Städten-Erzeugungs-Modell
%p	Prozentpunkte

10 Notationen

Indizes und Mengen

$d \in Z$	Menge Z der Verkehrszellen d
$i \in VSys$	Menge $VSys$ der Verkehrssysteme i
$g \in G$	Menge G der Nachfragegruppen g
$k \in K$	Menge K der Strukturgrößen k
$m \in M$	Menge M der Strukturgrößen m
$o \in Z$	Menge Z der Verkehrszellen o
$r \in R$	Menge R der Routen r
$s \in S$	Menge S der Netzelemente s

Parameter

α, β	Parameter für allgemeine CR-Funktion
$\beta_{gk}^p, \beta_{gk}^a$	Produktions- bzw. Attraktionsrate für Nachfragegruppe g und Strukturgröße k
β_{gk}^d	Parameter für die Aufwandsempfindlichkeit von g gegenüber der Kenngröße k bei der Zielwahl
β_{gkm}^m	Parameter für die Aufwandsempfindlichkeit von g gegenüber der Kenngröße k mit dem Modus m
β_{g0m}^m, β_0	modusspezifische Nutzenkonstante
β_c	Aufwandsempfindlichkeitsparameter gegenüber den Kosten c
β_{t^v}, β_{t^w}	Aufwandsempfindlichkeitsparameter gegenüber Fahrt- und Wartezeit
$\beta_{t,g}$	Aufwandsempfindlichkeitsparameter für empfundene Fahrtzeit von Nachfragegruppe g in 1/Zeiteinheit
$\beta_t^{n-autom}$	Wahrnehmungsparameter nichtautomatisierte Fahrtzeit, einheitenlos
β_t^{autom}	Wahrnehmungsparameter automatisierte Fahrtzeit, einheitenlos
β_t^{red}	Anpassungsfaktor, einheitenlos
$\beta_{t,s}^{autom}$	Wahrnehmungsparameter für automatisierte Fahrtzeit auf Ebene der Netzelemente s , einheitenlos
$\beta_{t,s}$	netzelementspezifischer Parameter für Fahrtzeit in 1/Zeiteinheit
$\beta_s^{AV-ready}$	AV-ready-Parameter für Netzelement s , wenn AV-ready: 1, sonst 0
c_1	Parameter zum konstanten Fahrzeugabstand in km/Fzg
c_2	Parameter zur Differenz zur freien Geschwindigkeit in $\text{km}^2/(\text{h} \cdot \text{Fzg})$

C_3	Parameter zur Geschwindigkeit in h/Fzg
$f_{d_{go}^p}, f_{d_{gd}^a}$	Anpassungsfaktoren für quell- bzw. zielseitiges Verkehrsaufkommen
f_i^{PE}	PE-Faktor für Verkehrssystem i in PE pro Fahrzeug
f_{CV}^{PE}, f_{AV}^{PE}	PE-Faktor für Verkehrssysteme CV und AV in PE pro Fahrzeug
$f_{s,AV}^{PE}$	PE-Faktor für AV auf Netzelement s in PE pro Fahrzeug
$f_{s,AV}^{PE}(p_{s,AV})$	PE-Faktor für AV-Anteil $p_{s,AV}$ auf Netzelement s in PE pro Fzg
$f_{s,AV}^{PE,p\%}$	PE-Faktor für AV bei $p\%$ AV für Messquerschnitt s
$f_{s,AV}^{PE,0\%}$	PE-Faktor für AV auf Netzelement s für einen AV-Anteil von 0 %
$f_{s,AV}^{PE,100\%}$	PE-Faktor für AV auf Netzelement s für einen AV-Anteil von 100 %
$t_{s,AV-AV}$	Nettozeitlücke zwischen AV und AV auf Netzelement s , in h
$t_{s,other}$	Nettozeitlücke für alle anderen Verkehrssysteme auf s in h
$t_{s,AV-CV}$	Nettozeitlücke zwischen AV und CV auf Netzelement s , in h
t^I	Grenzwert für die Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit
x_s^{crit}	Kritische Auslastung auf Netzelement s

Variablen- und Matrixbezeichner

d_{go}^p	produzierte Wege d der Nachfragegruppe g in der Verkehrszelle o
d_{gd}^a	angezogene Wege d der Nachfragegruppe g in der Zelle d
d_{god}	Ortsveränderungen von g auf der Relation von o nach d
d_{godm}	Ortsveränderungen von g auf der Relation von o nach d mit m
d_{godmr}	Ortsveränderungen von Nachfragegruppe g auf der Relation von Zelle o nach Zelle d mit Modus m auf Route r
G	Relative Gap
k	Verkehrsdichte in Fzg/km
$k_s^{\max}(v_s)$	maximale Dichte bei Geschwindigkeit v_s auf s in Fzg/km
k_{krit}	Dichte bei maximal beobachteter Verkehrsstärke in Fzg/km
k_{\max}	maximale Dichte in Fzg/km
l_s^{mean}	durchschnittliche Fahrzeuglänge auf Netzelement s in km/Fzg
P_{godm}	Wahrscheinlichkeit für Nachfragegruppe g auf der Relation von Zelle o nach Zelle d den Modus m zu wählen

p_{AV}	AV-Anteil in der Fahrzeugflotte
$p_{s,AV}$	AV-Anteil auf Netzelement s
q^{\max}	größte, beobachtete Verkehrsstärke in Fzg/Zeiteinheit
q_s	Verkehrsstärke auf Netzelement s in Fzg/Zeiteinheit
q_s^{\max}	Kapazität von Netzelement s in PE/Zeiteinheit
$q_s^{\max}(v_s)$	maximale Verkehrsstärke für Geschwindigkeit v_s in Fzg/h
$q_{s,p\%}^{\max}$	Kapazität für $p\%$ AV für Querschnitt s in Fzg/h
$q_{s,0\%}^{\max}$	Kapazität für 0 % AV für Messquerschnitt s in PE/h
$q_{s,CV}, q_{s,AV}$	Verkehrsstärken für CV und AV auf Netzelement s in Fzg/h
t_s	Fahrtzeit auf Netzelement s für $q_s \neq 0$ in Sekunden
t_s^0	Fahrtzeit auf Netzelement s für $q_s = 0$ in Sekunden
t_s^{BPR}	Fahrtzeit als Ergebnis der BPR-Funktion
$t_s^{mean}(p_{s,AV})$	durchschn. Nettozeitlücke für AV-Anteil $p_{s,AV}$ auf s in h/Fzg
$t_{od}^{AV,autom}$	Automatisierte Fahrtzeit für Verkehrssystem AV von o nach d
$t_{od}^{AV,autom,perc}$	Empfundene automatisierte Fahrtzeit für AV von o nach d
$t_{od}^{Car,perc}$	Gewichtete empfundene Fahrtzeit für den Modus Pkw-Fahrer von Quelle o nach Ziel d
$t_{od}^{CV,perc}, t_{od}^{AV,perc}$	Empfundene Fahrtzeiten für CV und AV von Quelle o zu Ziel d
$t_{odr}^{CV}, t_{odr}^{AV}$	Fahrtzeiten mit CV bzw. AV auf r von o nach d
$t_{odr}^{CV,perc}, t_{odr}^{AV,perc}$	empfundene Fahrtzeiten mit CV bzw. AV auf r von o nach d
$t_{odr}^{AV,autom}$	Automatisierte Fahrtzeit mit AV auf r von o nach d
$t_{odrs}^{CV}, t_{odrs}^{AV}$	Fahrtzeiten mit CV bzw. AV auf r von o nach d auf s
$t_{odrs}^{AV,autom}$	Automatisierte Fahrtzeit mit AV auf r von o nach d auf s
t_s^{CV}, t_s^{AV}	Fahrtzeiten mit CV bzw. AV auf Netzelement s
$t_s^{AV,autom}$	automatisierte Fahrtzeit von AV auf Netzelement s
$T^{AV,perc}$	Empfundene Fahrtzeitenmatrix für AV
$T^{CV,perc}$	Empfundene Fahrtzeitenmatrix für CV
$T^{Car,perc}$	Empfundene Fahrtzeitenmatrix für Modus Pkw
v	Momentane Geschwindigkeit in km/h

v^0, v_{frei}	Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss in km/h
v_{krit}	Geschwindigkeit bei maximal beobachteter Verkehrsstärke
v_{god}	Nutzen der Ortsveränderung für g von Zelle o nach d
v_{godm}	Nutzen der Ortsveränderung für g von Zelle o nach d mit m
$v_{t,god}^{Car}$	Nutzen aus Fahrtzeiten für Nachfragegruppe g mit dem Modus Pkw von Quelle o nach Ziel
V_{Ist}	tatsächlicher Verkehrszeitaufwand im Netz in Fahrzeugstunden
V_{Hypo}	hypothetischer Verkehrszeitaufwand im Netz in Fahrzeugstunden
$w_{t,s}^{CV}, w_{t,s}^{AV}$	Widerstand aus Fahrtzeiten für CV bzw. AV auf Netzelement s
x_B	Wert der Kenngröße x des Basiszustands
x_c	Kosten in Geldeinheiten
x_E	Wert der Kenngröße x des erwarteten Zustands
x_{god}	Log-Summe der bewerteten Nutzen aller Modi für Ortsveränderung von Nachfragegruppe g auf der Relation von Zelle o nach Zelle d
x_{kod}	Wert der Kenngröße k für Relation von o nach d
x_{kodm}	Wert der Kenngröße k für Relation von o nach d mit Modus m
x_p	Wert der Kenngröße x des Prognosezustands
$x_{rebound}$	Rebound-Effekt zur Kenngröße x als Anteil in Prozent
x_s	Auslastung auf Netzelement s
x_{t^v}, x_{t^w}	Fahrtzeit und Wartezeit in Zeiteinheiten
z_{ko}, z_{kd}	Wert für Strukturgröße k in Verkehrszelle o bzw. d

Funktionen

$f(q_s)$	allgemeine CR-Funktion
$f^{BPR}(q_s)$	BPR-Funktion mit Funktionsparametern α und β
f^{Lohse}	Lohse-Funktion mit Funktionsparametern α, β und x_s^{crit}
$f(v_{god})$	Bewertungsfunktion für den Nutzen
$f(v_{godm})$	Bewertungsfunktion für den Nutzen
$f(x_{god})$	Bewertungsfunktion für die Log-Summe der bewerteten Nutzenwerte für alle Modi

Anhang

A1 Ausprägungen zentraler Annahmen

Szenariengruppe	Abkürzung	AV-Klasse	untersuchte AV-Anteile
Introductory	Intr	Basic	20 %, 40 %, 60 %
Established	Esta	Intermediate	40 %, 60 %, 80 %
Prevalent	Prev	Advanced	60 %, 80 %, 100 %
Prevalent-Extreme	Pr-Ex	Advanced (modifiziert)	60 %, 80 %, 100 %
Original	Orig	- (ohne spezifische Klasse)	20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %
Original-t5	Orig-t5	- (ohne spezifische Klasse)	20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %
Original-t0	Orig-t0	- (ohne spezifische Klasse)	20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %

Tabelle 23: Szenariengruppen und zugehörige Eckdaten für Modellanwendung

		Introductory	Established	Prevalent	Prevalent-Extreme	Original, Original-t5, Original-t0
Straßenklasse	enthalten in AV-ready Netz	Basic AV	Intermediate AV	Advanced AV	Advanced AV (mod.)	-
S1	N1, N2, N3, N4	1,20	0,77	0,73	0,73	1,00
S2	N2, N3, N4	1,26	0,81	0,76	0,76	1,00
S3	N3, N4	(n. a.) 1,00	1,32	0,85	0,85	1,00
S4	N4	(n. a.) 1,00	(n. a.) 1,00	(n. a.) 1,00	0,85	1,00

Tabelle 24: Straßenklassen, AV-ready Netzzugehörigkeit und PE-Faktoren für alle Szenariengruppen (mod. für modifiziert, n. a. für nicht automatisiert)

Szenariengruppen	Name	Parameter Ziel- und Moduswahl		Parameter Routenwahl	
		Wahrnehmungsparameter	Grenzwert	Wahrnehmungsparameter	Grenzwert
Intr, Esta, Prev, Pr-Ex	normal	$\beta_t^{autom} = 1,00$	entfällt	$\beta_{t,s}^{autom} = 1,00$	entfällt
Intr, Esta, Prev, Pr-Ex, Orig	red-15	$\beta_t^{autom} = 0,85$	$t^l = 10 \text{ min}$	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,90$	nicht anwendbar
Intr, Esta, Prev, Pr-Ex, Orig	red-30	$\beta_t^{autom} = 0,70$	$t^l = 10 \text{ min}$	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,80$	nicht anwendbar
Orig-t5	red-15	$\beta_t^{autom} = 0,85$	$t^l = 5 \text{ min}$	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,90$	nicht anwendbar
Orig-t5	red-30	$\beta_t^{autom} = 0,70$	$t^l = 5 \text{ min}$	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,80$	nicht anwendbar
Orig-t0	red-15	$\beta_t^{autom} = 0,85$	$t^l = 0 \text{ min}$	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,85$	entfällt
Orig-t0	red-30	$\beta_t^{autom} = 0,70$	$t^l = 0 \text{ min}$	$\beta_{t,s}^{autom} = 0,70$	entfällt

Tabelle 25: Parameter für angepasste Wahrnehmung automatisierter Fahrtzeit

Hinweis zu Kapitel 6.4.1: In den Szenarien mit den AV-ready Netzen N1*, N2* und N3* wird die Umlegung mit der jeweiligen AV-ready Netzvariante (N1, N2 oder N3), jedoch ohne angepasste Widerstandsfunktionen für Fahrtzeitwahrnehmung durchgeführt.

A2 Berechnungsmethodik zum Rebound-Effekt

Als Kenngröße soll auch der Rebound-Effekt, der sich in Szenarien mit AV gegenüber dem Basisszenario einstellt, quantifiziert und ausgewiesen werden. Der Verkehrszeit-aufwand und die mittlere Fahrtzeit aus der Matrixauswertung stellen geeignete Bezugs-kenngrößen dar, weil zu erwarten ist, dass direkte Rebound-Effekte durch Effizienzstei-gerungen in beiden Größen vorkommen. Tatsächliche Effizienzsteigerungen entstehen durch eine höhere Leistungsfähigkeit der Pkw-Flotte und durch Einflüsse aus einer ver-änderten Zeitwahrnehmung kann es zu empfundenen Effizienzsteigerungen kommen.

Der direkte Rebound-Effekt stellt gemäß der Erläuterung in Kapitel 2.5 die Folgen eines veränderten Nutzungsverhaltens eines Produkts aufgrund einer Effizienzsteigerung des Produkts selbst dar. Durch diesen Effekt ergeben sich geringere Einsparungen, als durch die ursprüngliche Effizienzsteigerung zu erwarten gewesen wäre. Der Rebound-Effekt im Rahmen der Szenarienauswertung betrachtet den Pkw als das Produkt und potenzi-elle Einsparungen bezogen auf die betrachteten Zeitaufwände.

Die Ermittlung des Rebound-Effekts für ein beliebiges AV-Szenario gegenüber dem Ba-sisszenario erfordert Ergebnisse für drei Zustände:

- Basis: Kenngröße für das Basisszenario,
- Prognose: Kenngröße für ein Szenario mit AV,
- Erwartung: Kenngröße für die unveränderte Nachfrage aus dem Basisszenario mit den Annahmen des AV-Szenarios.

Letzterer Zustand ist ein modifizierter Ausgangszustand, der benötigt wird, um die er-warteten Änderungen gegenüber dem Ausgangszustand bestimmen zu können, wenn außer den Effizienzsteigerungen alles gleichbleibt. Dieser Zustand wird aus dem Ba-sisszenario mit folgenden Schritten für jedes AV-Szenario hergestellt:

- Setzen eines AV-Anteils (20-100 %), AV entsprechen dabei zunächst vollständig CV,
- Nachträgliche Anpassung der CR-Funktionen, sodass diese AV mit zugehörigen PE-Faktoren berücksichtigen und damit Fahrtzeiten im belasteten Zustand nachträglich aktualisieren können,
- Setzen der Annahmen für AV bezüglich PE-Faktoren, Zeitwahrnehmung und AV-ready Netz,
- Ohne erneute Umlegung: Bestimmen der aktualisierten Kenngrößen.

So lassen sich die Kenngrößen für die unveränderte Nachfrage und Routenwahl bestim-men, die Effekte für einen bestimmten AV-Anteil samt zu einem Szenario gehörenden Annahmen beinhalten. Einflüsse durch eine veränderte Zeitwahrnehmung entsprechen nur einer empfundenen Effizienzsteigerung, weswegen für die Ermittlung des Rebound-Effekts der empfundene Verkehrszeit-aufwand und die empfundene, mittlere Fahrtzeit herangezogen werden.

Die Berechnung aus den Kenngrößen der drei Zustände erfolgt mit Formel (54). Rebound-Effekte für Szenarien, in denen keine Effizienzsteigerung zugrunde liegt, werden nicht betrachtet.

$$x_{rebound} = 1 - \frac{x_P - x_B}{x_E - x_B} \quad (54)$$

mit

$x_{rebound}$	Rebound-Effekt zur Kenngröße x als Anteil in Prozent
x_P	Wert der Kenngröße x des Prognosezustands
x_B	Wert der Kenngröße x des Basiszustands
x_E	Wert der Kenngröße x des erwarteten Zustands

A3 Ergebnisse zu allen untersuchten Szenarien

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse zu allen 181 untersuchten Szenarien zu finden.

Jede der acht Tabellen listet zu einer Kenngröße oder Gruppe von Kenngrößen die zum Basisszenario normierten oder absoluten Werte auf fünf Seiten auf. Dabei ist jedes Szenario durch die Angabe der Szenariengruppe, des AV-Anteils, der Annahme für die Zeitwahrnehmung und die AV-ready Netzvariante eindeutig bestimmt. Auf jeder Seite befinden sich zu Vergleichszwecken stets die Werte des Basisszenarios in der ersten Ergebniszeile.

Für die Erläuterung der Abkürzungen und eine Übersicht zu den Ausprägungen der zugrundeliegenden Annahmen sei auf Abschnitt A1 verwiesen.

Die Zuordnung zwischen Tabellen und Kenngrößen ist wie folgt:

- Tabelle 26 zeigt den wegebasierten Modal-Split und die Änderung des Pkw-Fahrer-Anteils im Vergleich zum Basisszenario,
- Tabelle 27 zeigt den zu Base normierten distanzbasierten Modal-Split, die Abweichung der Summe und die Änderungen der mittleren Fahrtweite und Verkehrsleistung der Pkw-Wege,
- Tabelle 28 zeigt den zu Base normierten zeitbasierten Modal-Split, die Abweichung der Summe und die Änderungen der mittleren Fahrtzeit und des Pkw-Zeitaufwands,
- Tabelle 29 zeigt diverse mittlere Kenngrößen und Rebound-Werte,
- Tabelle 30 zeigt die Fahrtweitenverteilung für Wege des Modus Pkw-Fahrer,
- Tabelle 31 zeigt die Fahrtzeitenverteilung für Wege des Modus Pkw-Fahrer,
- Tabelle 32 zeigt die Pkw-Fahrleistung nach Gebieten und Straßenklassen und die Abweichung der Summe zu Base,
- Tabelle 33 zeigt den Pkw-Zeitaufwand nach Gebieten und Straßenklassen und die Abweichung der Summe zu Base.

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Pkw-Fahrer	Pkw-Mitfahrer	ÖV	Rad & Fuß	Änderung Anteil Pkw-Fahrer zu Base
Base	0	-	-	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	-
Intr	20	normal	N1	48,0%	9,2%	13,5%	29,3%	-0,1%
Intr	40	normal	N1	47,9%	9,2%	13,5%	29,3%	-0,1%
Intr	60	normal	N1	47,9%	9,2%	13,6%	29,3%	-0,2%
Esta	40	normal	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,2%
Esta	60	normal	N1	48,1%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,2%
Esta	80	normal	N1	48,1%	9,3%	13,5%	29,1%	+0,3%
Prev	60	normal	N1	48,1%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,3%
Prev	80	normal	N1	48,1%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,4%
Prev	100	normal	N1	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,4%
Intr	20	normal	N2	47,9%	9,2%	13,5%	29,3%	-0,1%
Intr	40	normal	N2	47,8%	9,2%	13,6%	29,4%	-0,3%
Intr	60	normal	N2	47,8%	9,2%	13,6%	29,4%	-0,4%
Esta	40	normal	N2	48,1%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,3%
Esta	60	normal	N2	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,4%
Esta	80	normal	N2	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,5%
Prev	60	normal	N2	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,5%
Prev	80	normal	N2	48,3%	9,3%	13,4%	29,0%	+0,7%
Prev	100	normal	N2	48,4%	9,3%	13,3%	29,0%	+0,8%
Intr	20	normal	N3	47,9%	9,2%	13,5%	29,3%	-0,1%
Intr	40	normal	N3	47,8%	9,2%	13,6%	29,4%	-0,3%
Intr	60	normal	N3	47,8%	9,2%	13,6%	29,4%	-0,4%
Esta	40	normal	N3	47,9%	9,2%	13,5%	29,3%	-0,2%
Esta	60	normal	N3	47,9%	9,2%	13,5%	29,4%	-0,3%
Esta	80	normal	N3	47,8%	9,2%	13,5%	29,4%	-0,3%
Prev	60	normal	N3	48,3%	9,3%	13,4%	29,0%	+0,8%
Prev	80	normal	N3	48,5%	9,4%	13,3%	28,9%	+1,0%
Prev	100	normal	N3	48,6%	9,4%	13,3%	28,8%	+1,3%
Intr	20	red-15	N1	47,9%	9,2%	13,5%	29,3%	-0,1%
Intr	40	red-15	N1	47,9%	9,2%	13,5%	29,3%	-0,1%
Intr	60	red-15	N1	47,9%	9,2%	13,5%	29,3%	-0,2%
Esta	40	red-15	N1	48,1%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,2%
Esta	60	red-15	N1	48,1%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,2%
Esta	80	red-15	N1	48,1%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,3%
Prev	60	red-15	N1	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,3%
Prev	80	red-15	N1	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,4%
Prev	100	red-15	N1	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,5%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Pkw-Fahrer	Pkw-Mitfahrer	ÖV	Rad & Fuß	Änderung Anteil Pkw-Fahrer zu Base
Base	0	-	-	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	-
Intr	20	red-15	N2	47,9%	9,2%	13,5%	29,3%	-0,1%
Intr	40	red-15	N2	47,9%	9,2%	13,6%	29,4%	-0,3%
Intr	60	red-15	N2	47,8%	9,2%	13,6%	29,4%	-0,4%
Esta	40	red-15	N2	48,1%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,3%
Esta	60	red-15	N2	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,5%
Esta	80	red-15	N2	48,3%	9,3%	13,4%	29,0%	+0,6%
Prev	60	red-15	N2	48,3%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,6%
Prev	80	red-15	N2	48,3%	9,3%	13,3%	29,0%	+0,8%
Prev	100	red-15	N2	48,4%	9,3%	13,3%	28,9%	+0,9%
Intr	20	red-15	N3	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,0%
Intr	40	red-15	N3	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,0%
Intr	60	red-15	N3	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Esta	40	red-15	N3	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Esta	60	red-15	N3	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,2%
Esta	80	red-15	N3	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,3%
Prev	60	red-15	N3	48,6%	9,4%	13,3%	28,8%	+1,3%
Prev	80	red-15	N3	48,8%	9,4%	13,2%	28,6%	+1,7%
Prev	100	red-15	N3	49,0%	9,5%	13,1%	28,5%	+2,1%
Intr	20	red-30	N1	47,9%	9,2%	13,5%	29,3%	-0,1%
Intr	40	red-30	N1	47,9%	9,2%	13,5%	29,3%	-0,2%
Intr	60	red-30	N1	47,9%	9,2%	13,5%	29,3%	-0,2%
Esta	40	red-30	N1	48,1%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,2%
Esta	60	red-30	N1	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,2%
Esta	80	red-30	N1	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,3%
Prev	60	red-30	N1	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,3%
Prev	80	red-30	N1	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,4%
Prev	100	red-30	N1	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,5%
Intr	20	red-30	N2	47,9%	9,2%	13,5%	29,3%	-0,2%
Intr	40	red-30	N2	47,9%	9,2%	13,5%	29,4%	-0,3%
Intr	60	red-30	N2	47,8%	9,2%	13,5%	29,4%	-0,4%
Esta	40	red-30	N2	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,4%
Esta	60	red-30	N2	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,5%
Esta	80	red-30	N2	48,3%	9,3%	13,3%	29,0%	+0,7%
Prev	60	red-30	N2	48,3%	9,3%	13,3%	29,0%	+0,6%
Prev	80	red-30	N2	48,4%	9,3%	13,3%	29,0%	+0,8%
Prev	100	red-30	N2	48,5%	9,4%	13,2%	28,9%	+1,0%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Pkw-Fahrer	Pkw-Mitfahrer	ÖV	Rad & Fuß	Änderung Anteil Pkw-Fahrer zu Base
Base	0	-	-	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	-
Intr	20	red-30	N3	48,1%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,2%
Intr	40	red-30	N3	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,4%
Intr	60	red-30	N3	48,3%	9,3%	13,3%	29,1%	+0,6%
Esta	40	red-30	N3	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,5%
Esta	60	red-30	N3	48,3%	9,3%	13,3%	29,1%	+0,7%
Esta	80	red-30	N3	48,5%	9,3%	13,2%	29,0%	+1,0%
Prev	60	red-30	N3	48,8%	9,4%	13,1%	28,6%	+1,8%
Prev	80	red-30	N3	49,1%	9,5%	13,0%	28,4%	+2,4%
Prev	100	red-30	N3	49,4%	9,6%	12,8%	28,2%	+3,0%
Pr-Ex	60	normal	N4	48,4%	9,3%	13,4%	28,9%	+0,8%
Pr-Ex	80	normal	N4	48,5%	9,4%	13,3%	28,8%	+1,1%
Pr-Ex	100	normal	N4	48,6%	9,4%	13,3%	28,7%	+1,4%
Pr-Ex	60	red-15	N4	48,7%	9,4%	13,2%	28,7%	+1,4%
Pr-Ex	80	red-15	N4	48,9%	9,4%	13,1%	28,5%	+1,9%
Pr-Ex	100	red-15	N4	49,1%	9,5%	13,0%	28,4%	+2,3%
Pr-Ex	60	red-30	N4	49,0%	9,5%	13,1%	28,5%	+2,1%
Pr-Ex	80	red-30	N4	49,3%	9,5%	12,9%	28,2%	+2,8%
Pr-Ex	100	red-30	N4	49,7%	9,6%	12,8%	28,0%	+3,4%
Orig	20	red-15	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	+0,0%
Orig	40	red-15	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	+0,0%
Orig	60	red-15	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	+0,0%
Orig	80	red-15	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	+0,0%
Orig	100	red-15	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	+0,0%
Orig	20	red-30	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	+0,0%
Orig	40	red-30	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	+0,0%
Orig	60	red-30	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	+0,0%
Orig	80	red-30	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	+0,0%
Orig	100	red-30	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	+0,0%
Orig	20	red-15	N2	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,0%
Orig	40	red-15	N2	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,0%
Orig	60	red-15	N2	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,0%
Orig	80	red-15	N2	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Orig	100	red-15	N2	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Orig	20	red-30	N2	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	+0,0%
Orig	40	red-30	N2	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	+0,0%
Orig	60	red-30	N2	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	+0,1%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Pkw-Fahrer	Pkw-Mitfahrer	ÖV	Rad & Fuß	Änderung Anteil Pkw-Fahrer zu Base
Base	0	-	-	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	-
Orig	80	red-30	N2	48,0%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,1%
Orig	100	red-30	N2	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,2%
Orig	20	red-15	N3	48,1%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,2%
Orig	40	red-15	N3	48,1%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,3%
Orig	60	red-15	N3	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,5%
Orig	80	red-15	N3	48,3%	9,3%	13,4%	29,0%	+0,6%
Orig	100	red-15	N3	48,4%	9,3%	13,3%	29,0%	+0,8%
Orig	20	red-30	N3	48,1%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,3%
Orig	40	red-30	N3	48,3%	9,3%	13,4%	29,0%	+0,7%
Orig	60	red-30	N3	48,5%	9,3%	13,3%	28,9%	+1,0%
Orig	80	red-30	N3	48,6%	9,4%	13,2%	28,8%	+1,3%
Orig	100	red-30	N3	48,8%	9,4%	13,1%	28,7%	+1,7%
Orig-t5	20	red-15	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,0%
Orig-t5	40	red-15	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,0%
Orig-t5	60	red-15	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Orig-t5	80	red-15	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Orig-t5	100	red-15	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Orig-t5	20	red-30	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,0%
Orig-t5	40	red-30	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Orig-t5	60	red-30	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Orig-t5	80	red-30	N1	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,2%
Orig-t5	100	red-30	N1	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,2%
Orig-t5	20	red-15	N2	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Orig-t5	40	red-15	N2	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Orig-t5	60	red-15	N2	48,1%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,2%
Orig-t5	80	red-15	N2	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,2%
Orig-t5	100	red-15	N2	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,3%
Orig-t5	20	red-30	N2	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Orig-t5	40	red-30	N2	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,2%
Orig-t5	60	red-30	N2	48,2%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,4%
Orig-t5	80	red-30	N2	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,5%
Orig-t5	100	red-30	N2	48,3%	9,3%	13,3%	29,1%	+0,6%
Orig-t5	20	red-15	N3	48,1%	9,3%	13,5%	29,1%	+0,3%
Orig-t5	40	red-15	N3	48,3%	9,3%	13,4%	29,0%	+0,6%
Orig-t5	60	red-15	N3	48,4%	9,3%	13,3%	28,9%	+0,9%
Orig-t5	80	red-15	N3	48,5%	9,4%	13,3%	28,8%	+1,1%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Pkw-Fahrer	Pkw-Mitfahrer	ÖV	Rad & Fuß	Änderung Anteil Pkw-Fahrer zu Base
Base	0	-	-	48,0%	9,3%	13,5%	29,3%	-
Orig-t5	100	red-15	N3	48,7%	9,4%	13,2%	28,7%	+1,4%
Orig-t5	20	red-30	N3	48,3%	9,3%	13,4%	29,0%	+0,6%
Orig-t5	40	red-30	N3	48,6%	9,4%	13,3%	28,8%	+1,2%
Orig-t5	60	red-30	N3	48,9%	9,4%	13,1%	28,6%	+1,8%
Orig-t5	80	red-30	N3	49,2%	9,5%	13,0%	28,4%	+2,4%
Orig-t5	100	red-30	N3	49,5%	9,6%	12,8%	28,1%	+3,0%
Orig-t0	20	red-15	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,0%
Orig-t0	40	red-15	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Orig-t0	60	red-15	N1	48,1%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Orig-t0	80	red-15	N1	48,1%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,2%
Orig-t0	100	red-15	N1	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,2%
Orig-t0	20	red-30	N1	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Orig-t0	40	red-30	N1	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,2%
Orig-t0	60	red-30	N1	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,3%
Orig-t0	80	red-30	N1	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,4%
Orig-t0	100	red-30	N1	48,2%	9,3%	13,3%	29,1%	+0,5%
Orig-t0	20	red-15	N2	48,0%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,1%
Orig-t0	40	red-15	N2	48,1%	9,3%	13,5%	29,2%	+0,2%
Orig-t0	60	red-15	N2	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,4%
Orig-t0	80	red-15	N2	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,5%
Orig-t0	100	red-15	N2	48,3%	9,3%	13,4%	29,0%	+0,6%
Orig-t0	20	red-30	N2	48,1%	9,3%	13,4%	29,2%	+0,3%
Orig-t0	40	red-30	N2	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,5%
Orig-t0	60	red-30	N2	48,4%	9,3%	13,3%	29,0%	+0,8%
Orig-t0	80	red-30	N2	48,5%	9,4%	13,2%	28,9%	+1,0%
Orig-t0	100	red-30	N2	48,6%	9,4%	13,2%	28,8%	+1,2%
Orig-t0	20	red-15	N3	48,2%	9,3%	13,4%	29,1%	+0,5%
Orig-t0	40	red-15	N3	48,4%	9,4%	13,3%	28,9%	+0,9%
Orig-t0	60	red-15	N3	48,7%	9,4%	13,2%	28,7%	+1,4%
Orig-t0	80	red-15	N3	48,9%	9,5%	13,1%	28,5%	+1,9%
Orig-t0	100	red-15	N3	49,1%	9,5%	13,0%	28,3%	+2,3%
Orig-t0	20	red-30	N3	48,4%	9,4%	13,3%	28,9%	+1,0%
Orig-t0	40	red-30	N3	48,9%	9,5%	13,1%	28,5%	+1,9%
Orig-t0	60	red-30	N3	49,4%	9,6%	12,9%	28,1%	+2,9%
Orig-t0	80	red-30	N3	49,9%	9,7%	12,7%	27,7%	+3,8%
Orig-t0	100	red-30	N3	50,3%	9,8%	12,5%	27,3%	+4,8%

Tabelle 26: Modal-Split Verkehrsaufkommen und Änderung Pkw-Fahrer zu Base.

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Pkw-Fahrer	Pkw-Mitfahrer	ÖV	Rad & Fuß	Abweichung der Summe zu Base	Änderung mittlere Fahrtweite Pkw-Fahrer zu Base	Änderung Pkw-Fahrleistung zu Base
Base	0	-	-	66,3	8,6	20,6	4,5	-	-	-
Intr	20	normal	N1	66,0	8,6	20,6	4,5	-0,2	-0,3%	-0,4%
Intr	40	normal	N1	65,8	8,5	20,6	4,6	-0,5	-0,6%	-0,7%
Intr	60	normal	N1	65,5	8,5	20,7	4,6	-0,7	-0,9%	-1,1%
Esta	40	normal	N1	66,9	8,7	20,5	4,5	+0,6	+0,8%	+1,0%
Esta	60	normal	N1	67,2	8,7	20,4	4,5	+0,9	+1,2%	+1,4%
Esta	80	normal	N1	67,5	8,8	20,4	4,5	+1,2	+1,6%	+1,9%
Prev	60	normal	N1	67,4	8,8	20,4	4,5	+1,1	+1,4%	+1,7%
Prev	80	normal	N1	67,8	8,8	20,3	4,5	+1,5	+1,9%	+2,3%
Prev	100	normal	N1	68,2	8,9	20,3	4,5	+1,8	+2,4%	+2,8%
Intr	20	normal	N2	65,9	8,5	20,6	4,6	-0,4	-0,5%	-0,6%
Intr	40	normal	N2	65,5	8,5	20,7	4,6	-0,8	-0,9%	-1,2%
Intr	60	normal	N2	65,1	8,4	20,8	4,6	-1,1	-1,4%	-1,8%
Esta	40	normal	N2	67,2	8,7	20,4	4,5	+0,8	+1,0%	+1,3%
Esta	60	normal	N2	67,6	8,8	20,4	4,5	+1,3	+1,6%	+2,0%
Esta	80	normal	N2	68,0	8,9	20,3	4,5	+1,7	+2,1%	+2,6%
Prev	60	normal	N2	67,9	8,8	20,3	4,5	+1,5	+1,9%	+2,4%
Prev	80	normal	N2	68,4	8,9	20,2	4,5	+2,1	+2,5%	+3,2%
Prev	100	normal	N2	69,0	9,0	20,1	4,5	+2,6	+3,2%	+4,0%
Intr	20	normal	N3	65,9	8,5	20,6	4,6	-0,4	-0,5%	-0,6%
Intr	40	normal	N3	65,5	8,5	20,7	4,6	-0,8	-0,9%	-1,2%
Intr	60	normal	N3	65,1	8,4	20,8	4,6	-1,1	-1,4%	-1,8%
Esta	40	normal	N3	66,4	8,6	20,6	4,6	+0,2	+0,4%	+0,2%
Esta	60	normal	N3	66,5	8,6	20,6	4,6	+0,3	+0,6%	+0,4%
Esta	80	normal	N3	66,7	8,6	20,5	4,6	+0,4	+0,9%	+0,5%
Prev	60	normal	N3	68,4	8,9	20,2	4,5	+2,0	+2,3%	+3,1%
Prev	80	normal	N3	69,0	9,0	20,1	4,5	+2,7	+3,1%	+4,2%
Prev	100	normal	N3	69,7	9,1	20,0	4,5	+3,3	+3,9%	+5,2%
Intr	20	red-15	N1	66,2	8,6	20,6	4,6	-0,1	-0,1%	-0,2%
Intr	40	red-15	N1	66,0	8,6	20,6	4,6	-0,2	-0,2%	-0,4%
Intr	60	red-15	N1	65,9	8,5	20,7	4,6	-0,3	-0,4%	-0,6%
Esta	40	red-15	N1	67,3	8,7	20,4	4,5	+1,0	+1,3%	+1,5%
Esta	60	red-15	N1	67,7	8,8	20,4	4,5	+1,5	+1,9%	+2,2%
Esta	80	red-15	N1	68,2	8,9	20,3	4,5	+1,9	+2,6%	+2,9%
Prev	60	red-15	N1	67,9	8,8	20,3	4,5	+1,6	+2,2%	+2,5%
Prev	80	red-15	N1	68,5	8,9	20,3	4,5	+2,2	+2,9%	+3,3%
Prev	100	red-15	N1	69,0	9,0	20,2	4,5	+2,7	+3,6%	+4,1%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Pkw-Fahrer	Pkw-Mitfahrer	ÖV	Rad & Fuß	Abweichung der Summe zu Base	Änderung mittlere Fahrweite Pkw-Fahrer zu Base	Änderung Pkw-Fahrleistung zu Base
Base	0	-	-	66,3	8,6	20,6	4,5	-	-	-
Intr	20	red-15	N2	66,1	8,6	20,6	4,6	-0,2	-0,1%	-0,3%
Intr	40	red-15	N2	65,9	8,5	20,7	4,6	-0,3	-0,3%	-0,5%
Intr	60	red-15	N2	65,7	8,5	20,7	4,6	-0,5	-0,4%	-0,8%
Esta	40	red-15	N2	67,8	8,8	20,4	4,5	+1,5	+1,9%	+2,2%
Esta	60	red-15	N2	68,5	8,9	20,3	4,5	+2,2	+2,8%	+3,3%
Esta	80	red-15	N2	69,2	9,0	20,2	4,5	+2,9	+3,7%	+4,4%
Prev	60	red-15	N2	68,8	9,0	20,2	4,5	+2,5	+3,2%	+3,8%
Prev	80	red-15	N2	69,6	9,1	20,1	4,5	+3,3	+4,2%	+5,0%
Prev	100	red-15	N2	70,4	9,2	20,0	4,5	+4,1	+5,3%	+6,3%
Intr	20	red-15	N3	66,6	8,6	20,5	4,5	+0,3	+0,4%	+0,4%
Intr	40	red-15	N3	66,9	8,7	20,5	4,5	+0,7	+0,9%	+0,9%
Intr	60	red-15	N3	67,2	8,7	20,5	4,5	+1,0	+1,3%	+1,4%
Esta	40	red-15	N3	67,8	8,8	20,4	4,5	+1,6	+2,2%	+2,3%
Esta	60	red-15	N3	68,7	9,0	20,3	4,5	+2,4	+3,4%	+3,6%
Esta	80	red-15	N3	69,5	9,1	20,2	4,5	+3,3	+4,6%	+4,9%
Prev	60	red-15	N3	70,6	9,3	20,0	4,5	+4,3	+5,1%	+6,4%
Prev	80	red-15	N3	72,0	9,5	19,8	4,4	+5,7	+6,9%	+8,7%
Prev	100	red-15	N3	73,6	9,7	19,6	4,4	+7,2	+8,7%	+11,0%
Intr	20	red-30	N1	66,3	8,6	20,6	4,6	+0,1	+0,1%	+0,0%
Intr	40	red-30	N1	66,4	8,6	20,6	4,6	+0,1	+0,3%	+0,1%
Intr	60	red-30	N1	66,4	8,6	20,6	4,6	+0,2	+0,4%	+0,2%
Esta	40	red-30	N1	67,7	8,8	20,4	4,5	+1,5	+2,0%	+2,2%
Esta	60	red-30	N1	68,4	8,9	20,3	4,5	+2,1	+2,9%	+3,2%
Esta	80	red-30	N1	69,1	9,0	20,3	4,5	+2,8	+3,8%	+4,2%
Prev	60	red-30	N1	68,6	8,9	20,3	4,5	+2,4	+3,2%	+3,5%
Prev	80	red-30	N1	69,3	9,0	20,2	4,5	+3,1	+4,2%	+4,6%
Prev	100	red-30	N1	70,0	9,1	20,1	4,5	+3,8	+5,1%	+5,6%
Intr	20	red-30	N2	66,4	8,6	20,6	4,6	+0,1	+0,3%	+0,1%
Intr	40	red-30	N2	66,5	8,6	20,6	4,6	+0,3	+0,6%	+0,3%
Intr	60	red-30	N2	66,6	8,6	20,6	4,6	+0,4	+0,9%	+0,5%
Esta	40	red-30	N2	68,5	8,9	20,3	4,5	+2,3	+3,0%	+3,4%
Esta	60	red-30	N2	69,6	9,1	20,2	4,5	+3,4	+4,5%	+5,0%
Esta	80	red-30	N2	70,7	9,2	20,0	4,5	+4,5	+5,9%	+6,6%
Prev	60	red-30	N2	70,0	9,1	20,1	4,5	+3,7	+4,9%	+5,6%
Prev	80	red-30	N2	71,2	9,3	20,0	4,5	+4,9	+6,4%	+7,3%
Prev	100	red-30	N2	72,3	9,5	19,8	4,5	+6,1	+7,9%	+9,0%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Pkw-Fahrer	Pkw-Mitfahrer	ÖV	Rad & Fuß	Abweichung der Summe zu Base	Änderung mittlere Fahrtweite Pkw-Fahrer zu Base	Änderung Pkw-Fahrleistung zu Base
Base	0	-	-	66,3	8,6	20,6	4,5	-	-	-
Intr	20	red-30	N3	67,3	8,8	20,5	4,5	+1,0	+1,3%	+1,5%
Intr	40	red-30	N3	68,4	8,9	20,3	4,5	+2,2	+2,7%	+3,1%
Intr	60	red-30	N3	69,5	9,1	20,2	4,5	+3,3	+4,2%	+4,8%
Esta	40	red-30	N3	69,3	9,1	20,2	4,5	+3,1	+4,1%	+4,5%
Esta	60	red-30	N3	70,9	9,3	20,0	4,5	+4,8	+6,3%	+7,0%
Esta	80	red-30	N3	72,7	9,6	19,8	4,5	+6,6	+8,7%	+9,7%
Prev	60	red-30	N3	72,9	9,6	19,7	4,4	+6,7	+8,1%	+10,0%
Prev	80	red-30	N3	75,4	10,0	19,4	4,4	+9,2	+11,1%	+13,7%
Prev	100	red-30	N3	78,0	10,4	19,1	4,3	+11,8	+14,2%	+17,6%
Pr-Ex	60	normal	N4	68,4	8,9	20,2	4,5	+2,0	+2,3%	+3,2%
Pr-Ex	80	normal	N4	69,1	9,0	20,1	4,5	+2,7	+3,1%	+4,2%
Pr-Ex	100	normal	N4	69,8	9,1	20,0	4,5	+3,4	+3,9%	+5,3%
Pr-Ex	60	red-15	N4	70,8	9,3	19,9	4,4	+4,5	+5,2%	+6,7%
Pr-Ex	80	red-15	N4	72,3	9,5	19,7	4,4	+6,0	+7,1%	+9,1%
Pr-Ex	100	red-15	N4	73,9	9,8	19,5	4,4	+7,6	+8,9%	+11,5%
Pr-Ex	60	red-30	N4	73,3	9,7	19,6	4,4	+7,1	+8,3%	+10,6%
Pr-Ex	80	red-30	N4	75,9	10,1	19,3	4,3	+9,7	+11,4%	+14,5%
Pr-Ex	100	red-30	N4	78,6	10,5	18,9	4,3	+12,4	+14,6%	+18,6%
Orig	20	red-15	N1	66,5	8,6	20,6	4,5	+0,2	+0,2%	+0,2%
Orig	40	red-15	N1	66,6	8,6	20,5	4,5	+0,3	+0,5%	+0,5%
Orig	60	red-15	N1	66,7	8,7	20,5	4,5	+0,5	+0,7%	+0,7%
Orig	80	red-15	N1	66,8	8,7	20,5	4,5	+0,6	+0,8%	+0,8%
Orig	100	red-15	N1	66,9	8,7	20,5	4,5	+0,7	+1,0%	+1,0%
Orig	20	red-30	N1	66,6	8,6	20,5	4,5	+0,4	+0,5%	+0,5%
Orig	40	red-30	N1	67,0	8,7	20,5	4,5	+0,7	+1,0%	+1,0%
Orig	60	red-30	N1	67,3	8,7	20,5	4,5	+1,0	+1,5%	+1,5%
Orig	80	red-30	N1	67,6	8,8	20,5	4,5	+1,4	+1,9%	+1,9%
Orig	100	red-30	N1	67,9	8,8	20,4	4,5	+1,6	+2,3%	+2,4%
Orig	20	red-15	N2	66,6	8,6	20,5	4,5	+0,3	+0,4%	+0,4%
Orig	40	red-15	N2	66,8	8,7	20,5	4,5	+0,6	+0,8%	+0,8%
Orig	60	red-15	N2	67,1	8,7	20,5	4,5	+0,8	+1,1%	+1,2%
Orig	80	red-15	N2	67,3	8,7	20,5	4,5	+1,0	+1,4%	+1,5%
Orig	100	red-15	N2	67,4	8,8	20,4	4,5	+1,2	+1,6%	+1,7%
Orig	20	red-30	N2	66,9	8,7	20,5	4,5	+0,7	+0,9%	+0,9%
Orig	40	red-30	N2	67,5	8,8	20,5	4,5	+1,3	+1,7%	+1,8%
Orig	60	red-30	N2	68,0	8,8	20,4	4,5	+1,8	+2,6%	+2,6%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Pkw-Fahrer	Pkw-Mitfahrer	ÖV	Rad & Fuß	Abweichung der Summe zu Base	Änderung mittlere Fahrweite Pkw-Fahrer zu Base	Änderung Pkw-Fahrleistung zu Base
Base	0	-	-	66,3	8,6	20,6	4,5	-	-	-
Orig	80	red-30	N2	68,6	8,9	20,3	4,5	+2,4	+3,3%	+3,4%
Orig	100	red-30	N2	69,0	9,0	20,3	4,5	+2,8	+3,9%	+4,1%
Orig	20	red-15	N3	67,0	8,7	20,5	4,5	+0,7	+0,9%	+1,1%
Orig	40	red-15	N3	67,7	8,8	20,4	4,5	+1,5	+1,8%	+2,1%
Orig	60	red-15	N3	68,4	8,9	20,3	4,5	+2,2	+2,7%	+3,2%
Orig	80	red-15	N3	69,1	9,0	20,2	4,5	+2,9	+3,7%	+4,3%
Orig	100	red-15	N3	69,9	9,2	20,1	4,5	+3,6	+4,6%	+5,4%
Orig	20	red-30	N3	67,7	8,8	20,4	4,5	+1,5	+1,8%	+2,1%
Orig	40	red-30	N3	69,2	9,1	20,2	4,5	+2,9	+3,7%	+4,4%
Orig	60	red-30	N3	70,7	9,3	20,0	4,5	+4,5	+5,6%	+6,7%
Orig	80	red-30	N3	72,4	9,5	19,8	4,4	+6,2	+7,7%	+9,2%
Orig	100	red-30	N3	74,1	9,8	19,6	4,4	+8,0	+9,9%	+11,8%
Orig-t5	20	red-15	N1	66,5	8,6	20,5	4,5	+0,2	+0,3%	+0,4%
Orig-t5	40	red-15	N1	66,8	8,7	20,5	4,5	+0,5	+0,7%	+0,7%
Orig-t5	60	red-15	N1	67,0	8,7	20,5	4,5	+0,7	+0,9%	+1,0%
Orig-t5	80	red-15	N1	67,1	8,7	20,5	4,5	+0,9	+1,2%	+1,3%
Orig-t5	100	red-15	N1	67,3	8,7	20,4	4,5	+1,0	+1,5%	+1,6%
Orig-t5	20	red-30	N1	66,8	8,7	20,5	4,5	+0,5	+0,7%	+0,8%
Orig-t5	40	red-30	N1	67,3	8,7	20,5	4,5	+1,0	+1,5%	+1,5%
Orig-t5	60	red-30	N1	67,8	8,8	20,4	4,5	+1,5	+2,1%	+2,3%
Orig-t5	80	red-30	N1	68,3	8,9	20,4	4,5	+2,0	+2,8%	+3,0%
Orig-t5	100	red-30	N1	68,7	8,9	20,3	4,5	+2,5	+3,4%	+3,6%
Orig-t5	20	red-15	N2	66,7	8,7	20,5	4,5	+0,4	+0,5%	+0,6%
Orig-t5	40	red-15	N2	67,0	8,7	20,5	4,5	+0,8	+1,0%	+1,1%
Orig-t5	60	red-15	N2	67,4	8,8	20,4	4,5	+1,1	+1,5%	+1,7%
Orig-t5	80	red-15	N2	67,7	8,8	20,4	4,5	+1,4	+1,9%	+2,1%
Orig-t5	100	red-15	N2	68,0	8,8	20,3	4,5	+1,7	+2,3%	+2,6%
Orig-t5	20	red-30	N2	67,2	8,7	20,5	4,5	+0,9	+1,2%	+1,3%
Orig-t5	40	red-30	N2	68,0	8,9	20,4	4,5	+1,7	+2,3%	+2,6%
Orig-t5	60	red-30	N2	68,8	9,0	20,3	4,5	+2,6	+3,4%	+3,8%
Orig-t5	80	red-30	N2	69,6	9,1	20,2	4,5	+3,3	+4,4%	+4,9%
Orig-t5	100	red-30	N2	70,2	9,2	20,1	4,5	+4,0	+5,3%	+5,9%
Orig-t5	20	red-15	N3	67,2	8,7	20,4	4,5	+0,9	+1,0%	+1,3%
Orig-t5	40	red-15	N3	68,1	8,9	20,3	4,5	+1,8	+2,1%	+2,7%
Orig-t5	60	red-15	N3	69,0	9,0	20,2	4,5	+2,7	+3,1%	+4,0%
Orig-t5	80	red-15	N3	69,9	9,2	20,0	4,5	+3,6	+4,2%	+5,4%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Pkw-Fahrer	Pkw-Mitfahrer	ÖV	Rad & Fuß	Abweichung der Summe zu Base	Änderung mittlere Fahrtweite Pkw-Fahrer zu Base	Änderung Pkw-Fahrleistung zu Base
Base	0	-	-	66,3	8,6	20,6	4,5	-	-	-
Orig-t5	100	red-15	N3	70,8	9,3	19,9	4,4	+4,5	+5,3%	+6,8%
Orig-t5	20	red-30	N3	68,1	8,9	20,3	4,5	+1,8	+2,1%	+2,7%
Orig-t5	40	red-30	N3	69,9	9,2	20,0	4,5	+3,6	+4,2%	+5,4%
Orig-t5	60	red-30	N3	71,8	9,5	19,8	4,4	+5,5	+6,5%	+8,4%
Orig-t5	80	red-30	N3	73,9	9,8	19,5	4,4	+7,6	+8,8%	+11,4%
Orig-t5	100	red-30	N3	76,0	10,2	19,2	4,3	+9,8	+11,4%	+14,7%
Orig-t0	20	red-15	N1	66,7	8,6	20,5	4,5	+0,4	+0,5%	+0,5%
Orig-t0	40	red-15	N1	67,0	8,7	20,5	4,5	+0,7	+0,9%	+1,0%
Orig-t0	60	red-15	N1	67,3	8,7	20,5	4,5	+1,0	+1,3%	+1,5%
Orig-t0	80	red-15	N1	67,6	8,8	20,4	4,5	+1,3	+1,7%	+1,9%
Orig-t0	100	red-15	N1	67,9	8,8	20,4	4,5	+1,6	+2,1%	+2,4%
Orig-t0	20	red-30	N1	67,1	8,7	20,5	4,5	+0,8	+1,1%	+1,2%
Orig-t0	40	red-30	N1	67,8	8,8	20,4	4,5	+1,6	+2,1%	+2,3%
Orig-t0	60	red-30	N1	68,6	8,9	20,3	4,5	+2,3	+3,1%	+3,4%
Orig-t0	80	red-30	N1	69,3	9,0	20,3	4,5	+3,1	+4,1%	+4,5%
Orig-t0	100	red-30	N1	69,9	9,1	20,2	4,5	+3,7	+4,9%	+5,4%
Orig-t0	20	red-15	N2	66,8	8,7	20,5	4,5	+0,5	+0,7%	+0,8%
Orig-t0	40	red-15	N2	67,3	8,8	20,4	4,5	+1,0	+1,3%	+1,6%
Orig-t0	60	red-15	N2	67,8	8,8	20,4	4,5	+1,5	+1,9%	+2,3%
Orig-t0	80	red-15	N2	68,3	8,9	20,3	4,5	+2,0	+2,5%	+3,0%
Orig-t0	100	red-15	N2	68,6	9,0	20,2	4,5	+2,3	+2,9%	+3,5%
Orig-t0	20	red-30	N2	67,5	8,8	20,4	4,5	+1,3	+1,6%	+1,9%
Orig-t0	40	red-30	N2	68,7	9,0	20,3	4,5	+2,5	+3,1%	+3,6%
Orig-t0	60	red-30	N2	69,8	9,1	20,1	4,5	+3,6	+4,5%	+5,3%
Orig-t0	80	red-30	N2	70,8	9,3	20,0	4,5	+4,6	+5,7%	+6,8%
Orig-t0	100	red-30	N2	71,6	9,4	19,9	4,5	+5,4	+6,7%	+8,1%
Orig-t0	20	red-15	N3	67,3	8,8	20,4	4,5	+1,0	+1,1%	+1,6%
Orig-t0	40	red-15	N3	68,4	9,0	20,2	4,5	+2,0	+2,2%	+3,2%
Orig-t0	60	red-15	N3	69,4	9,1	20,0	4,4	+3,0	+3,3%	+4,8%
Orig-t0	80	red-15	N3	70,5	9,3	19,8	4,4	+4,1	+4,4%	+6,4%
Orig-t0	100	red-15	N3	71,6	9,5	19,6	4,4	+5,1	+5,5%	+8,0%
Orig-t0	20	red-30	N3	68,4	9,0	20,2	4,5	+2,0	+2,2%	+3,2%
Orig-t0	40	red-30	N3	70,6	9,4	19,8	4,4	+4,2	+4,5%	+6,5%
Orig-t0	60	red-30	N3	72,8	9,7	19,4	4,3	+6,3	+6,8%	+9,9%
Orig-t0	80	red-30	N3	75,2	10,1	19,0	4,3	+8,7	+9,3%	+13,5%
Orig-t0	100	red-30	N3	77,7	10,6	18,6	4,2	+11,1	+11,9%	+17,3%

Tabelle 27: Modal-Split Verkehrsleistung, normiert auf Base $\hat{=}$ 100

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Pkw-Fahrer	Pkw-Mitfahrer	ÖV	Rad & Fuß	Abweichung der Summe zu Base	Änderung mittlere Fahrtzeit Pkw-Fahrer zu Base	Änderung Pkw-Zeit-aufwand zu Base
Base	0	-	-	46,3	6,4	30,8	16,5	-	-	-
Intr	20	normal	N1	46,3	6,4	30,9	16,5	+0,1	+0,1%	+0,0%
Intr	40	normal	N1	46,3	6,3	30,9	16,5	+0,1	+0,1%	+0,0%
Intr	60	normal	N1	46,3	6,3	31,0	16,6	+0,1	+0,1%	-0,0%
Esta	40	normal	N1	46,3	6,4	30,7	16,5	-0,1	-0,1%	+0,1%
Esta	60	normal	N1	46,3	6,4	30,7	16,5	-0,1	-0,1%	+0,1%
Esta	80	normal	N1	46,3	6,4	30,6	16,4	-0,2	-0,2%	+0,1%
Prev	60	normal	N1	46,4	6,4	30,6	16,5	-0,1	-0,1%	+0,1%
Prev	80	normal	N1	46,3	6,4	30,6	16,4	-0,2	-0,3%	+0,1%
Prev	100	normal	N1	46,3	6,4	30,5	16,4	-0,4	-0,4%	+0,0%
Intr	20	normal	N2	46,3	6,4	30,9	16,5	+0,1	+0,2%	+0,0%
Intr	40	normal	N2	46,3	6,3	31,0	16,6	+0,2	+0,3%	-0,0%
Intr	60	normal	N2	46,3	6,3	31,1	16,6	+0,3	+0,3%	-0,1%
Esta	40	normal	N2	46,3	6,4	30,7	16,5	-0,1	-0,2%	+0,1%
Esta	60	normal	N2	46,3	6,4	30,6	16,4	-0,2	-0,3%	+0,1%
Esta	80	normal	N2	46,3	6,4	30,5	16,4	-0,4	-0,5%	+0,0%
Prev	60	normal	N2	46,3	6,4	30,5	16,4	-0,3	-0,4%	+0,1%
Prev	80	normal	N2	46,3	6,4	30,4	16,4	-0,5	-0,6%	+0,1%
Prev	100	normal	N2	46,3	6,4	30,3	16,3	-0,6	-0,9%	-0,0%
Intr	20	normal	N3	46,3	6,4	30,9	16,5	+0,1	+0,2%	+0,0%
Intr	40	normal	N3	46,3	6,3	31,0	16,6	+0,2	+0,3%	-0,0%
Intr	60	normal	N3	46,3	6,3	31,1	16,6	+0,3	+0,3%	-0,1%
Esta	40	normal	N3	46,5	6,4	30,8	16,6	+0,3	+0,6%	+0,4%
Esta	60	normal	N3	46,6	6,4	30,8	16,6	+0,4	+0,8%	+0,6%
Esta	80	normal	N3	46,6	6,4	30,8	16,6	+0,5	+1,1%	+0,7%
Prev	60	normal	N3	46,2	6,4	30,4	16,3	-0,6	-0,9%	-0,2%
Prev	80	normal	N3	46,2	6,4	30,3	16,3	-0,9	-1,3%	-0,3%
Prev	100	normal	N3	46,1	6,4	30,1	16,2	-1,2	-1,8%	-0,5%
Intr	20	red-15	N1	46,4	6,4	30,9	16,5	+0,1	+0,2%	+0,2%
Intr	40	red-15	N1	46,4	6,4	30,9	16,5	+0,2	+0,4%	+0,3%
Intr	60	red-15	N1	46,5	6,4	30,9	16,6	+0,3	+0,6%	+0,4%
Esta	40	red-15	N1	46,5	6,4	30,7	16,5	+0,0	+0,2%	+0,4%
Esta	60	red-15	N1	46,5	6,4	30,6	16,5	+0,0	+0,2%	+0,5%
Esta	80	red-15	N1	46,6	6,4	30,6	16,4	+0,0	+0,3%	+0,6%
Prev	60	red-15	N1	46,5	6,4	30,6	16,5	-0,0	+0,2%	+0,5%
Prev	80	red-15	N1	46,6	6,4	30,5	16,4	-0,0	+0,2%	+0,6%
Prev	100	red-15	N1	46,6	6,4	30,4	16,4	-0,1	+0,2%	+0,6%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Pkw-Fahrer	Pkw-Mitfahrer	ÖV	Rad & Fuß	Abweichung der Summe zu Base	Änderung mittlere Fahrtzeit Pkw-Fahrer zu Base	Änderung Pkw-Zeit-aufwand zu Base
Base	0	-	-	46,3	6,4	30,8	16,5	-	-	-
Intr	20	red-15	N2	46,5	6,4	30,9	16,5	+0,3	+0,6%	+0,4%
Intr	40	red-15	N2	46,7	6,4	30,9	16,6	+0,6	+1,1%	+0,9%
Intr	60	red-15	N2	46,9	6,4	31,0	16,6	+0,9	+1,6%	+1,2%
Esta	40	red-15	N2	46,7	6,4	30,6	16,4	+0,2	+0,6%	+0,9%
Esta	60	red-15	N2	46,9	6,5	30,5	16,4	+0,3	+0,8%	+1,3%
Esta	80	red-15	N2	47,1	6,5	30,4	16,4	+0,3	+1,0%	+1,6%
Prev	60	red-15	N2	46,9	6,5	30,4	16,4	+0,2	+0,7%	+1,3%
Prev	80	red-15	N2	47,1	6,5	30,3	16,3	+0,2	+0,9%	+1,6%
Prev	100	red-15	N2	47,2	6,5	30,2	16,3	+0,2	+1,0%	+1,9%
Intr	20	red-15	N3	46,9	6,4	30,8	16,5	+0,7	+1,3%	+1,3%
Intr	40	red-15	N3	47,5	6,5	30,8	16,5	+1,3	+2,6%	+2,6%
Intr	60	red-15	N3	48,1	6,6	30,7	16,5	+2,0	+3,9%	+4,0%
Esta	40	red-15	N3	47,7	6,6	30,6	16,5	+1,5	+3,0%	+3,1%
Esta	60	red-15	N3	48,5	6,7	30,5	16,5	+2,2	+4,4%	+4,7%
Esta	80	red-15	N3	49,2	6,8	30,4	16,5	+2,9	+6,0%	+6,3%
Prev	60	red-15	N3	48,0	6,7	30,1	16,2	+0,9	+2,3%	+3,6%
Prev	80	red-15	N3	48,5	6,8	29,9	16,1	+1,2	+3,0%	+4,7%
Prev	100	red-15	N3	49,0	6,9	29,6	16,0	+1,5	+3,7%	+5,8%
Intr	20	red-30	N1	46,5	6,4	30,9	16,5	+0,2	+0,5%	+0,4%
Intr	40	red-30	N1	46,7	6,4	30,9	16,6	+0,5	+0,9%	+0,8%
Intr	60	red-30	N1	46,8	6,4	30,9	16,6	+0,7	+1,4%	+1,2%
Esta	40	red-30	N1	46,7	6,4	30,7	16,5	+0,2	+0,6%	+0,8%
Esta	60	red-30	N1	46,8	6,4	30,6	16,5	+0,3	+0,9%	+1,1%
Esta	80	red-30	N1	47,0	6,5	30,5	16,4	+0,4	+1,2%	+1,5%
Prev	60	red-30	N1	46,8	6,5	30,5	16,5	+0,3	+0,8%	+1,1%
Prev	80	red-30	N1	47,0	6,5	30,5	16,4	+0,4	+1,1%	+1,5%
Prev	100	red-30	N1	47,1	6,5	30,4	16,4	+0,4	+1,3%	+1,8%
Intr	20	red-30	N2	46,8	6,4	30,9	16,6	+0,6	+1,2%	+1,0%
Intr	40	red-30	N2	47,3	6,5	30,9	16,6	+1,2	+2,4%	+2,1%
Intr	60	red-30	N2	47,8	6,5	30,9	16,6	+1,8	+3,6%	+3,2%
Esta	40	red-30	N2	47,3	6,5	30,5	16,4	+0,7	+1,7%	+2,1%
Esta	60	red-30	N2	47,8	6,6	30,4	16,4	+1,1	+2,6%	+3,1%
Esta	80	red-30	N2	48,2	6,7	30,2	16,4	+1,5	+3,4%	+4,2%
Prev	60	red-30	N2	47,7	6,6	30,3	16,4	+1,0	+2,5%	+3,1%
Prev	80	red-30	N2	48,2	6,7	30,1	16,3	+1,4	+3,2%	+4,1%
Prev	100	red-30	N2	48,6	6,7	30,0	16,3	+1,7	+4,0%	+5,1%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Pkw-Fahrer	Pkw-Mitfahrer	ÖV	Rad & Fuß	Abweichung der Summe zu Base	Änderung mittlere Fahrtzeit Pkw-Fahrer zu Base	Änderung Pkw-Zeit-aufwand zu Base
Base	0	-	-	46,3	6,4	30,8	16,5	-	-	-
Intr	20	red-30	N3	47,5	6,5	30,7	16,5	+1,2	+2,5%	+2,7%
Intr	40	red-30	N3	48,8	6,7	30,6	16,4	+2,5	+5,1%	+5,5%
Intr	60	red-30	N3	50,3	6,9	30,4	16,4	+3,9	+7,9%	+8,5%
Esta	40	red-30	N3	49,0	6,8	30,4	16,4	+2,7	+5,4%	+5,9%
Esta	60	red-30	N3	50,5	7,0	30,2	16,4	+4,1	+8,4%	+9,2%
Esta	80	red-30	N3	52,2	7,2	30,0	16,3	+5,7	+11,6%	+12,7%
Prev	60	red-30	N3	49,9	7,0	29,8	16,1	+2,8	+6,0%	+7,9%
Prev	80	red-30	N3	51,2	7,2	29,4	15,9	+3,7	+8,1%	+10,7%
Prev	100	red-30	N3	52,6	7,4	29,0	15,8	+4,8	+10,3%	+13,6%
Pr-Ex	60	normal	N4	46,2	6,4	30,4	16,3	-0,7	-1,1%	-0,3%
Pr-Ex	80	normal	N4	46,1	6,4	30,3	16,3	-1,0	-1,5%	-0,4%
Pr-Ex	100	normal	N4	46,0	6,4	30,1	16,2	-1,3	-2,0%	-0,7%
Pr-Ex	60	red-15	N4	48,2	6,7	30,1	16,2	+1,2	+2,7%	+4,1%
Pr-Ex	80	red-15	N4	48,8	6,8	29,8	16,1	+1,5	+3,5%	+5,4%
Pr-Ex	100	red-15	N4	49,4	6,9	29,5	15,9	+1,8	+4,2%	+6,7%
Pr-Ex	60	red-30	N4	50,4	7,1	29,7	16,0	+3,2	+6,7%	+8,9%
Pr-Ex	80	red-30	N4	51,8	7,3	29,3	15,8	+4,2	+9,0%	+12,0%
Pr-Ex	100	red-30	N4	53,3	7,5	28,8	15,7	+5,3	+11,3%	+15,2%
Orig	20	red-15	N1	46,4	6,4	30,8	16,5	+0,1	+0,2%	+0,2%
Orig	40	red-15	N1	46,5	6,4	30,8	16,5	+0,2	+0,3%	+0,3%
Orig	60	red-15	N1	46,5	6,4	30,8	16,5	+0,2	+0,5%	+0,5%
Orig	80	red-15	N1	46,6	6,4	30,8	16,5	+0,2	+0,5%	+0,5%
Orig	100	red-15	N1	46,6	6,4	30,8	16,5	+0,3	+0,6%	+0,6%
Orig	20	red-30	N1	46,5	6,4	30,8	16,5	+0,2	+0,4%	+0,4%
Orig	40	red-30	N1	46,7	6,4	30,8	16,5	+0,4	+0,8%	+0,8%
Orig	60	red-30	N1	46,8	6,4	30,7	16,5	+0,5	+1,2%	+1,2%
Orig	80	red-30	N1	47,0	6,4	30,7	16,5	+0,7	+1,5%	+1,5%
Orig	100	red-30	N1	47,2	6,5	30,7	16,5	+0,8	+1,9%	+1,9%
Orig	20	red-15	N2	46,5	6,4	30,8	16,5	+0,2	+0,4%	+0,4%
Orig	40	red-15	N2	46,7	6,4	30,8	16,5	+0,4	+0,9%	+0,9%
Orig	60	red-15	N2	46,9	6,4	30,7	16,5	+0,6	+1,2%	+1,3%
Orig	80	red-15	N2	47,1	6,5	30,7	16,5	+0,7	+1,6%	+1,6%
Orig	100	red-15	N2	47,2	6,5	30,7	16,5	+0,9	+1,9%	+2,0%
Orig	20	red-30	N2	46,8	6,4	30,8	16,5	+0,5	+1,0%	+1,1%
Orig	40	red-30	N2	47,3	6,5	30,7	16,5	+1,0	+2,1%	+2,1%
Orig	60	red-30	N2	47,8	6,5	30,6	16,5	+1,5	+3,1%	+3,2%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Pkw-Fahrer	Pkw-Mitfahrer	ÖV	Rad & Fuß	Abweichung der Summe zu Base	Änderung mittlere Fahrtzeit Pkw-Fahrer zu Base	Änderung Pkw-Zeit-aufwand zu Base
Base	0	-	-	46,3	6,4	30,8	16,5	-	-	-
Orig	80	red-30	N2	48,3	6,6	30,6	16,5	+2,0	+4,1%	+4,3%
Orig	100	red-30	N2	48,7	6,7	30,5	16,5	+2,4	+5,1%	+5,3%
Orig	20	red-15	N3	46,9	6,5	30,7	16,5	+0,6	+1,2%	+1,3%
Orig	40	red-15	N3	47,5	6,5	30,6	16,4	+1,1	+2,3%	+2,6%
Orig	60	red-15	N3	48,2	6,6	30,5	16,4	+1,7	+3,5%	+4,0%
Orig	80	red-15	N3	48,8	6,7	30,4	16,4	+2,3	+4,7%	+5,4%
Orig	100	red-15	N3	49,4	6,8	30,3	16,3	+2,9	+5,9%	+6,8%
Orig	20	red-30	N3	47,5	6,5	30,6	16,4	+1,1	+2,3%	+2,7%
Orig	40	red-30	N3	48,8	6,7	30,4	16,4	+2,3	+4,8%	+5,5%
Orig	60	red-30	N3	50,2	6,9	30,2	16,3	+3,6	+7,4%	+8,5%
Orig	80	red-30	N3	51,7	7,2	29,9	16,2	+5,0	+10,2%	+11,7%
Orig	100	red-30	N3	53,4	7,4	29,6	16,1	+6,5	+13,4%	+15,3%
Orig-t5	20	red-15	N1	46,4	6,4	30,8	16,5	+0,1	+0,3%	+0,3%
Orig-t5	40	red-15	N1	46,6	6,4	30,8	16,5	+0,3	+0,6%	+0,6%
Orig-t5	60	red-15	N1	46,7	6,4	30,7	16,5	+0,4	+0,8%	+0,9%
Orig-t5	80	red-15	N1	46,8	6,4	30,7	16,5	+0,5	+1,0%	+1,1%
Orig-t5	100	red-15	N1	46,9	6,4	30,7	16,5	+0,5	+1,2%	+1,3%
Orig-t5	20	red-30	N1	46,6	6,4	30,8	16,5	+0,3	+0,7%	+0,7%
Orig-t5	40	red-30	N1	46,9	6,4	30,7	16,5	+0,6	+1,3%	+1,4%
Orig-t5	60	red-30	N1	47,3	6,5	30,7	16,5	+0,9	+2,0%	+2,1%
Orig-t5	80	red-30	N1	47,6	6,5	30,6	16,5	+1,2	+2,6%	+2,8%
Orig-t5	100	red-30	N1	47,9	6,6	30,5	16,5	+1,5	+3,2%	+3,5%
Orig-t5	20	red-15	N2	46,6	6,4	30,8	16,5	+0,3	+0,6%	+0,7%
Orig-t5	40	red-15	N2	46,9	6,4	30,7	16,5	+0,6	+1,2%	+1,3%
Orig-t5	60	red-15	N2	47,2	6,5	30,7	16,5	+0,8	+1,8%	+1,9%
Orig-t5	80	red-15	N2	47,5	6,5	30,6	16,5	+1,1	+2,3%	+2,5%
Orig-t5	100	red-15	N2	47,7	6,5	30,6	16,5	+1,3	+2,8%	+3,1%
Orig-t5	20	red-30	N2	47,0	6,5	30,7	16,5	+0,7	+1,4%	+1,5%
Orig-t5	40	red-30	N2	47,7	6,6	30,6	16,5	+1,3	+2,9%	+3,1%
Orig-t5	60	red-30	N2	48,5	6,7	30,5	16,4	+2,1	+4,3%	+4,7%
Orig-t5	80	red-30	N2	49,2	6,7	30,4	16,4	+2,7	+5,8%	+6,3%
Orig-t5	100	red-30	N2	49,9	6,8	30,3	16,4	+3,4	+7,2%	+7,8%
Orig-t5	20	red-15	N3	47,1	6,5	30,7	16,4	+0,7	+1,4%	+1,6%
Orig-t5	40	red-15	N3	47,9	6,6	30,5	16,4	+1,3	+2,8%	+3,4%
Orig-t5	60	red-15	N3	48,7	6,7	30,3	16,3	+2,0	+4,2%	+5,1%
Orig-t5	80	red-15	N3	49,5	6,9	30,2	16,2	+2,7	+5,6%	+6,8%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Pkw-Fahrer	Pkw-Mitfahrer	ÖV	Rad & Fuß	Abweichung der Summe zu Base	Änderung mittlere Fahrtzeit Pkw-Fahrer zu Base	Änderung Pkw-Zeit-aufwand zu Base
Base	0	-	-	46,3	6,4	30,8	16,5	-	-	-
Orig-t5	100	red-15	N3	50,3	7,0	30,0	16,2	+3,4	+7,1%	+8,6%
Orig-t5	20	red-30	N3	47,9	6,6	30,5	16,4	+1,3	+2,8%	+3,4%
Orig-t5	40	red-30	N3	49,5	6,9	30,2	16,2	+2,7	+5,7%	+6,9%
Orig-t5	60	red-30	N3	51,3	7,1	29,8	16,1	+4,3	+8,8%	+10,8%
Orig-t5	80	red-30	N3	53,2	7,4	29,4	15,9	+6,0	+12,2%	+14,9%
Orig-t5	100	red-30	N3	55,3	7,8	29,1	15,7	+7,9	+16,0%	+19,5%
Orig-t0	20	red-15	N1	46,5	6,4	30,8	16,5	+0,2	+0,4%	+0,5%
Orig-t0	40	red-15	N1	46,7	6,4	30,7	16,5	+0,4	+0,8%	+0,9%
Orig-t0	60	red-15	N1	46,9	6,4	30,7	16,5	+0,6	+1,2%	+1,4%
Orig-t0	80	red-15	N1	47,1	6,5	30,6	16,5	+0,7	+1,6%	+1,7%
Orig-t0	100	red-15	N1	47,3	6,5	30,6	16,5	+0,9	+1,9%	+2,2%
Orig-t0	20	red-30	N1	46,8	6,4	30,7	16,5	+0,4	+1,0%	+1,1%
Orig-t0	40	red-30	N1	47,3	6,5	30,6	16,5	+0,9	+2,0%	+2,2%
Orig-t0	60	red-30	N1	47,8	6,6	30,5	16,5	+1,4	+3,0%	+3,3%
Orig-t0	80	red-30	N1	48,4	6,6	30,5	16,4	+1,9	+4,1%	+4,5%
Orig-t0	100	red-30	N1	48,9	6,7	30,4	16,4	+2,4	+5,1%	+5,7%
Orig-t0	20	red-15	N2	46,7	6,4	30,7	16,5	+0,4	+0,8%	+1,0%
Orig-t0	40	red-15	N2	47,2	6,5	30,7	16,5	+0,8	+1,6%	+1,9%
Orig-t0	60	red-15	N2	47,6	6,5	30,6	16,4	+1,1	+2,4%	+2,8%
Orig-t0	80	red-15	N2	48,0	6,6	30,5	16,4	+1,5	+3,2%	+3,7%
Orig-t0	100	red-15	N2	48,4	6,6	30,4	16,4	+1,8	+3,9%	+4,5%
Orig-t0	20	red-30	N2	47,3	6,5	30,6	16,5	+0,9	+2,0%	+2,2%
Orig-t0	40	red-30	N2	48,4	6,7	30,5	16,4	+1,9	+4,0%	+4,5%
Orig-t0	60	red-30	N2	49,5	6,8	30,3	16,3	+2,9	+6,1%	+6,9%
Orig-t0	80	red-30	N2	50,6	7,0	30,1	16,3	+3,9	+8,2%	+9,3%
Orig-t0	100	red-30	N2	51,7	7,1	30,0	16,2	+5,0	+10,3%	+11,6%
Orig-t0	20	red-15	N3	47,2	6,5	30,6	16,4	+0,7	+1,5%	+2,0%
Orig-t0	40	red-15	N3	48,2	6,7	30,4	16,3	+1,4	+3,0%	+4,0%
Orig-t0	60	red-15	N3	49,1	6,8	30,1	16,1	+2,2	+4,6%	+6,1%
Orig-t0	80	red-15	N3	50,1	7,0	29,9	16,0	+2,9	+6,2%	+8,1%
Orig-t0	100	red-15	N3	51,1	7,1	29,6	15,9	+3,7	+7,8%	+10,3%
Orig-t0	20	red-30	N3	48,2	6,7	30,3	16,3	+1,5	+3,1%	+4,1%
Orig-t0	40	red-30	N3	50,2	7,0	29,8	16,0	+3,0	+6,3%	+8,3%
Orig-t0	60	red-30	N3	52,3	7,3	29,3	15,8	+4,7	+9,8%	+12,9%
Orig-t0	80	red-30	N3	54,6	7,7	28,8	15,5	+6,6	+13,5%	+17,9%
Orig-t0	100	red-30	N3	57,1	8,1	28,3	15,3	+8,7	+17,6%	+23,3%

Tabelle 28: Modal-Split Verkehrszeitaufwand, normiert auf Base \triangleq 100

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	mittlere Fahrtweite in km	mittlere Fahrzeit in min	mittlere Geschwindigkeit in km/h	mittlere Verlustzeit in min	Verlustzeit / Fahrtweite in min pro km	Verlustzeit / Fahrzeit in min pro min	Rebound bzgl. der mittleren Fahrzeit	Rebound bzgl. des Pkw-Zeitaufwands
Base	0	-	-	9,7	14,8	39,5	4,1	0,42	0,28	-	-
Intr	20	normal	N1	9,7	14,8	39,3	4,1	0,42	0,28	-	-
Intr	40	normal	N1	9,7	14,8	39,2	4,1	0,43	0,28	-	-
Intr	60	normal	N1	9,6	14,8	39,0	4,2	0,43	0,28	-	-
Esta	40	normal	N1	9,8	14,8	39,8	4,0	0,41	0,27	66%	76%
Esta	60	normal	N1	9,8	14,8	40,0	4,0	0,41	0,27	64%	74%
Esta	80	normal	N1	9,9	14,7	40,2	4,0	0,40	0,27	62%	72%
Prev	60	normal	N1	9,9	14,8	40,1	4,0	0,40	0,27	67%	77%
Prev	80	normal	N1	9,9	14,7	40,3	3,9	0,40	0,27	64%	75%
Prev	100	normal	N1	10,0	14,7	40,6	3,9	0,39	0,26	62%	72%
Intr	20	normal	N2	9,7	14,8	39,2	4,1	0,43	0,28	-	-
Intr	40	normal	N2	9,6	14,8	39,0	4,2	0,44	0,28	-	-
Intr	60	normal	N2	9,6	14,8	38,8	4,2	0,44	0,29	-	-
Esta	40	normal	N2	9,8	14,8	39,9	4,0	0,41	0,27	72%	83%
Esta	60	normal	N2	9,9	14,7	40,2	3,9	0,40	0,27	70%	81%
Esta	80	normal	N2	9,9	14,7	40,5	3,9	0,39	0,26	68%	80%
Prev	60	normal	N2	9,9	14,7	40,4	3,9	0,39	0,26	72%	84%
Prev	80	normal	N2	10,0	14,7	40,7	3,8	0,38	0,26	70%	82%
Prev	100	normal	N2	10,0	14,6	41,1	3,7	0,37	0,26	67%	80%
Intr	20	normal	N3	9,7	14,8	39,2	4,1	0,43	0,28	-	-
Intr	40	normal	N3	9,6	14,8	39,0	4,2	0,44	0,28	-	-
Intr	60	normal	N3	9,6	14,8	38,8	4,2	0,44	0,29	-	-
Esta	40	normal	N3	9,8	14,9	39,4	4,2	0,43	0,28	-	-
Esta	60	normal	N3	9,8	14,9	39,4	4,2	0,43	0,28	-	-
Esta	80	normal	N3	9,8	14,9	39,4	4,3	0,43	0,28	-	-
Prev	60	normal	N3	9,9	14,6	40,8	3,8	0,38	0,26	70%	84%
Prev	80	normal	N3	10,0	14,6	41,2	3,6	0,36	0,25	68%	82%
Prev	100	normal	N3	10,1	14,5	41,7	3,5	0,35	0,24	66%	80%
Intr	20	red-15	N1	9,7	14,8	39,3	4,1	0,43	0,28	-	-
Intr	40	red-15	N1	9,7	14,8	39,2	4,2	0,43	0,28	-	-
Intr	60	red-15	N1	9,7	14,9	39,1	4,2	0,44	0,28	-	-
Esta	40	red-15	N1	9,8	14,8	39,9	4,1	0,41	0,27	59%	68%
Esta	60	red-15	N1	9,9	14,8	40,1	4,0	0,41	0,27	57%	66%
Esta	80	red-15	N1	10,0	14,8	40,4	4,0	0,40	0,27	55%	64%
Prev	60	red-15	N1	9,9	14,8	40,3	4,0	0,40	0,27	60%	69%
Prev	80	red-15	N1	10,0	14,8	40,5	4,0	0,40	0,27	57%	66%
Prev	100	red-15	N1	10,1	14,8	40,8	4,0	0,39	0,27	55%	64%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	mittlere Fahrtweite in km	mittlere Fahrtzeit in min	mittlere Geschwindigkeit in km/h	mittlere Verlustzeit in min	Verlustzeit / Fahrtweite in min pro km	Verlustzeit / Fahrtzeit in min pro min	Rebound bzgl. der mittleren Fahrtzeit	Rebound bzgl. des Pkw-Zeitaufwands
Base	0	-	-	9,7	14,8	39,5	4,1	0,42	0,28	-	-
Intr	20	red-15	N2	9,7	14,9	39,2	4,2	0,43	0,28	-	-
Intr	40	red-15	N2	9,7	14,9	38,9	4,3	0,44	0,29	-	-
Intr	60	red-15	N2	9,7	15,0	38,7	4,4	0,45	0,29	-	-
Esta	40	red-15	N2	9,9	14,9	40,0	4,1	0,41	0,27	68%	79%
Esta	60	red-15	N2	10,0	14,9	40,3	4,0	0,40	0,27	67%	77%
Esta	80	red-15	N2	10,1	14,9	40,5	4,0	0,40	0,27	65%	75%
Prev	60	red-15	N2	10,0	14,9	40,5	4,0	0,40	0,27	68%	79%
Prev	80	red-15	N2	10,1	14,9	40,8	4,0	0,39	0,27	66%	77%
Prev	100	red-15	N2	10,2	14,9	41,2	3,9	0,38	0,26	64%	75%
Intr	20	red-15	N3	9,8	15,0	39,1	4,2	0,43	0,28	12%	17%
Intr	40	red-15	N3	9,8	15,2	38,8	4,4	0,45	0,29	13%	18%
Intr	60	red-15	N3	9,9	15,4	38,5	4,6	0,46	0,30	16%	20%
Esta	40	red-15	N3	9,9	15,2	39,2	4,4	0,44	0,29	85%	90%
Esta	60	red-15	N3	10,0	15,4	39,1	4,5	0,45	0,29	82%	88%
Esta	80	red-15	N3	10,2	15,7	39,0	4,7	0,46	0,30	80%	87%
Prev	60	red-15	N3	10,2	15,1	40,6	4,0	0,39	0,27	72%	85%
Prev	80	red-15	N3	10,4	15,2	41,0	4,0	0,38	0,26	70%	84%
Prev	100	red-15	N3	10,6	15,3	41,4	3,9	0,37	0,26	69%	83%
Intr	20	red-30	N1	9,7	14,8	39,3	4,2	0,43	0,28	-	-
Intr	40	red-30	N1	9,7	14,9	39,2	4,2	0,44	0,28	-	-
Intr	60	red-30	N1	9,8	15,0	39,1	4,3	0,44	0,29	-	-
Esta	40	red-30	N1	9,9	14,9	40,0	4,1	0,41	0,28	56%	63%
Esta	60	red-30	N1	10,0	14,9	40,3	4,1	0,41	0,28	53%	61%
Esta	80	red-30	N1	10,1	14,9	40,5	4,1	0,41	0,28	51%	59%
Prev	60	red-30	N1	10,0	14,9	40,4	4,1	0,41	0,27	55%	63%
Prev	80	red-30	N1	10,1	14,9	40,7	4,1	0,40	0,27	53%	61%
Prev	100	red-30	N1	10,2	15,0	41,0	4,1	0,40	0,27	50%	58%
Intr	20	red-30	N2	9,8	15,0	39,1	4,3	0,44	0,29	-	-
Intr	40	red-30	N2	9,8	15,1	38,8	4,5	0,46	0,29	-	-
Intr	60	red-30	N2	9,8	15,3	38,4	4,6	0,47	0,30	-	-
Esta	40	red-30	N2	10,0	15,0	40,0	4,2	0,42	0,28	67%	76%
Esta	60	red-30	N2	10,2	15,2	40,2	4,2	0,42	0,28	65%	74%
Esta	80	red-30	N2	10,3	15,3	40,4	4,3	0,41	0,28	63%	73%
Prev	60	red-30	N2	10,2	15,1	40,4	4,2	0,41	0,28	65%	76%
Prev	80	red-30	N2	10,3	15,3	40,7	4,2	0,41	0,28	63%	74%
Prev	100	red-30	N2	10,5	15,4	41,0	4,2	0,40	0,28	61%	72%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	mittlere Fahrtweite in km	mittlere Fahrzeit in min	mittlere Geschwindigkeit in km/h	mittlere Verlustzeit in min	Verlustzeit / Fahrtweite in min pro km	Verlustzeit / Fahrzeit in min pro min	Rebound bzgl. der mittleren Fahrzeit	Rebound bzgl. des Pkw-Zeitaufwands
Base	0	-	-	9,7	14,8	39,5	4,1	0,42	0,28	-	-
Intr	20	red-30	N3	9,9	15,1	39,0	4,3	0,44	0,29	61%	71%
Intr	40	red-30	N3	10,0	15,5	38,6	4,6	0,46	0,30	61%	72%
Intr	60	red-30	N3	10,1	15,9	38,1	4,9	0,48	0,31	62%	72%
Esta	40	red-30	N3	10,1	15,6	39,0	4,6	0,46	0,30	79%	88%
Esta	60	red-30	N3	10,3	16,0	38,7	4,9	0,47	0,30	77%	87%
Esta	80	red-30	N3	10,6	16,5	38,4	5,2	0,49	0,31	76%	86%
Prev	60	red-30	N3	10,5	15,7	40,3	4,3	0,41	0,28	71%	85%
Prev	80	red-30	N3	10,8	16,0	40,6	4,4	0,41	0,27	69%	83%
Prev	100	red-30	N3	11,1	16,3	40,9	4,5	0,40	0,27	67%	81%
Pr-Ex	60	normal	N4	9,9	14,6	40,8	3,7	0,38	0,26	68%	83%
Pr-Ex	80	normal	N4	10,0	14,6	41,3	3,6	0,36	0,25	67%	81%
Pr-Ex	100	normal	N4	10,1	14,5	41,8	3,5	0,34	0,24	65%	79%
Pr-Ex	60	red-15	N4	10,2	15,2	40,5	4,1	0,40	0,27	71%	86%
Pr-Ex	80	red-15	N4	10,4	15,3	40,9	4,0	0,39	0,26	70%	85%
Pr-Ex	100	red-15	N4	10,6	15,4	41,2	4,0	0,38	0,26	69%	84%
Pr-Ex	60	red-30	N4	10,5	15,8	40,1	4,4	0,42	0,28	69%	84%
Pr-Ex	80	red-30	N4	10,8	16,1	40,4	4,5	0,41	0,28	67%	82%
Pr-Ex	100	red-30	N4	11,1	16,4	40,6	4,5	0,41	0,28	66%	81%
Orig	20	red-15	N1	9,7	14,8	39,5	4,1	0,42	0,28	23%	24%
Orig	40	red-15	N1	9,8	14,8	39,5	4,1	0,42	0,28	23%	23%
Orig	60	red-15	N1	9,8	14,8	39,6	4,1	0,42	0,28	23%	23%
Orig	80	red-15	N1	9,8	14,9	39,6	4,1	0,42	0,28	22%	23%
Orig	100	red-15	N1	9,8	14,9	39,6	4,2	0,42	0,28	22%	23%
Orig	20	red-30	N1	9,8	14,8	39,5	4,1	0,42	0,28	30%	29%
Orig	40	red-30	N1	9,8	14,9	39,6	4,2	0,43	0,28	30%	29%
Orig	60	red-30	N1	9,9	14,9	39,6	4,2	0,43	0,28	32%	32%
Orig	80	red-30	N1	9,9	15,0	39,6	4,3	0,43	0,28	31%	31%
Orig	100	red-30	N1	9,9	15,1	39,7	4,3	0,43	0,29	31%	31%
Orig	20	red-15	N2	9,8	14,8	39,5	4,1	0,42	0,28	45%	47%
Orig	40	red-15	N2	9,8	14,9	39,4	4,2	0,43	0,28	46%	48%
Orig	60	red-15	N2	9,8	15,0	39,4	4,2	0,43	0,28	45%	48%
Orig	80	red-15	N2	9,9	15,0	39,4	4,2	0,43	0,28	43%	46%
Orig	100	red-15	N2	9,9	15,1	39,4	4,3	0,43	0,28	43%	45%
Orig	20	red-30	N2	9,8	14,9	39,4	4,2	0,43	0,28	56%	58%
Orig	40	red-30	N2	9,9	15,1	39,4	4,3	0,44	0,29	54%	57%
Orig	60	red-30	N2	10,0	15,2	39,3	4,4	0,44	0,29	54%	57%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	mittlere Fahrweite in km	mittlere Fahrzeit in min	mittlere Geschwindigkeit in km/h	mittlere Verlustzeit in min	Verlustzeit / Fahrweite in min pro km	Verlustzeit / Fahrzeit in min pro min	Rebound bzgl. der mittleren Fahrzeit	Rebound bzgl. des Pkw-Zeitaufwands
Base	0	-	-	9,7	14,8	39,5	4,1	0,42	0,28	-	-
Orig	80	red-30	N2	10,0	15,4	39,2	4,5	0,45	0,30	54%	56%
Orig	100	red-30	N2	10,1	15,5	39,0	4,7	0,46	0,30	53%	56%
Orig	20	red-15	N3	9,8	14,9	39,4	4,2	0,43	0,28	67%	78%
Orig	40	red-15	N3	9,9	15,1	39,3	4,3	0,43	0,28	68%	78%
Orig	60	red-15	N3	10,0	15,3	39,2	4,4	0,44	0,29	68%	78%
Orig	80	red-15	N3	10,1	15,5	39,1	4,5	0,45	0,29	68%	78%
Orig	100	red-15	N3	10,2	15,7	39,0	4,6	0,45	0,29	68%	78%
Orig	20	red-30	N3	9,9	15,1	39,3	4,3	0,43	0,28	71%	83%
Orig	40	red-30	N3	10,1	15,5	39,1	4,5	0,45	0,29	71%	82%
Orig	60	red-30	N3	10,3	15,9	38,8	4,7	0,46	0,30	70%	82%
Orig	80	red-30	N3	10,5	16,3	38,6	5,0	0,47	0,30	70%	81%
Orig	100	red-30	N3	10,7	16,8	38,3	5,2	0,49	0,31	69%	81%
Orig-t5	20	red-15	N1	9,8	14,8	39,5	4,1	0,42	0,28	35%	39%
Orig-t5	40	red-15	N1	9,8	14,9	39,5	4,1	0,42	0,28	35%	38%
Orig-t5	60	red-15	N1	9,8	14,9	39,5	4,2	0,42	0,28	34%	37%
Orig-t5	80	red-15	N1	9,8	14,9	39,6	4,2	0,43	0,28	33%	36%
Orig-t5	100	red-15	N1	9,9	15,0	39,6	4,2	0,43	0,28	33%	36%
Orig-t5	20	red-30	N1	9,8	14,9	39,5	4,2	0,42	0,28	41%	45%
Orig-t5	40	red-30	N1	9,9	15,0	39,5	4,2	0,43	0,28	41%	45%
Orig-t5	60	red-30	N1	9,9	15,1	39,5	4,3	0,43	0,29	42%	46%
Orig-t5	80	red-30	N1	10,0	15,2	39,5	4,4	0,44	0,29	41%	45%
Orig-t5	100	red-30	N1	10,1	15,3	39,5	4,4	0,44	0,29	40%	45%
Orig-t5	20	red-15	N2	9,8	14,9	39,4	4,1	0,42	0,28	48%	54%
Orig-t5	40	red-15	N2	9,8	15,0	39,4	4,2	0,43	0,28	48%	55%
Orig-t5	60	red-15	N2	9,9	15,0	39,4	4,3	0,43	0,28	49%	55%
Orig-t5	80	red-15	N2	9,9	15,1	39,3	4,3	0,44	0,29	47%	53%
Orig-t5	100	red-15	N2	9,9	15,2	39,3	4,4	0,44	0,29	47%	53%
Orig-t5	20	red-30	N2	9,8	15,0	39,4	4,2	0,43	0,28	54%	61%
Orig-t5	40	red-30	N2	9,9	15,2	39,3	4,4	0,44	0,29	53%	61%
Orig-t5	60	red-30	N2	10,1	15,4	39,1	4,5	0,45	0,29	53%	61%
Orig-t5	80	red-30	N2	10,2	15,6	39,0	4,7	0,46	0,30	53%	60%
Orig-t5	100	red-30	N2	10,2	15,8	38,8	4,8	0,47	0,31	53%	60%
Orig-t5	20	red-15	N3	9,8	15,0	39,3	4,2	0,43	0,28	56%	70%
Orig-t5	40	red-15	N3	9,9	15,2	39,2	4,3	0,44	0,28	57%	71%
Orig-t5	60	red-15	N3	10,0	15,4	39,1	4,4	0,44	0,29	57%	70%
Orig-t5	80	red-15	N3	10,1	15,6	38,9	4,6	0,45	0,29	57%	70%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	mittlere Fahrtweite in km	mittlere Fahrzeit in min	mittlere Geschwindigkeit in km/h	mittlere Verlustzeit in min	Verlustzeit / Fahrtweite in min pro km	Verlustzeit / Fahrzeit in min pro min	Rebound bzgl. der mittleren Fahrzeit	Rebound bzgl. des Pkw-Zeitaufwands
Base	0	-	-	9,7	14,8	39,5	4,1	0,42	0,28	-	-
Orig-t5	100	red-15	N3	10,2	15,8	38,8	4,7	0,46	0,30	57%	70%
Orig-t5	20	red-30	N3	9,9	15,2	39,2	4,3	0,44	0,28	58%	72%
Orig-t5	40	red-30	N3	10,1	15,6	38,9	4,6	0,45	0,29	57%	72%
Orig-t5	60	red-30	N3	10,3	16,1	38,6	4,8	0,47	0,30	57%	71%
Orig-t5	80	red-30	N3	10,6	16,6	38,3	5,1	0,49	0,31	57%	71%
Orig-t5	100	red-30	N3	10,8	17,1	37,9	5,5	0,51	0,32	56%	70%
Orig-t0	20	red-15	N1	9,8	14,8	39,5	4,1	0,42	0,28	36%	42%
Orig-t0	40	red-15	N1	9,8	14,9	39,5	4,2	0,43	0,28	35%	41%
Orig-t0	60	red-15	N1	9,9	15,0	39,5	4,2	0,43	0,28	35%	41%
Orig-t0	80	red-15	N1	9,9	15,0	39,5	4,3	0,43	0,28	35%	41%
Orig-t0	100	red-15	N1	9,9	15,1	39,6	4,3	0,43	0,28	35%	41%
Orig-t0	20	red-30	N1	9,8	14,9	39,5	4,2	0,43	0,28	34%	40%
Orig-t0	40	red-30	N1	9,9	15,1	39,5	4,3	0,44	0,29	37%	44%
Orig-t0	60	red-30	N1	10,0	15,2	39,5	4,4	0,44	0,29	38%	45%
Orig-t0	80	red-30	N1	10,1	15,4	39,5	4,6	0,45	0,30	39%	46%
Orig-t0	100	red-30	N1	10,2	15,5	39,4	4,7	0,46	0,30	40%	47%
Orig-t0	20	red-15	N2	9,8	14,9	39,4	4,2	0,43	0,28	43%	52%
Orig-t0	40	red-15	N2	9,8	15,0	39,3	4,3	0,43	0,28	43%	52%
Orig-t0	60	red-15	N2	9,9	15,1	39,3	4,3	0,44	0,29	43%	52%
Orig-t0	80	red-15	N2	10,0	15,2	39,2	4,4	0,44	0,29	43%	52%
Orig-t0	100	red-15	N2	10,0	15,3	39,1	4,5	0,45	0,29	43%	52%
Orig-t0	20	red-30	N2	9,9	15,1	39,3	4,3	0,44	0,29	42%	53%
Orig-t0	40	red-30	N2	10,0	15,4	39,1	4,5	0,45	0,29	43%	53%
Orig-t0	60	red-30	N2	10,2	15,7	38,9	4,8	0,47	0,30	43%	53%
Orig-t0	80	red-30	N2	10,3	16,0	38,6	5,0	0,49	0,31	44%	54%
Orig-t0	100	red-30	N2	10,4	16,3	38,2	5,3	0,51	0,32	44%	54%
Orig-t0	20	red-15	N3	9,8	15,0	39,3	4,2	0,43	0,28	45%	61%
Orig-t0	40	red-15	N3	9,9	15,2	39,2	4,4	0,44	0,29	45%	60%
Orig-t0	60	red-15	N3	10,0	15,5	39,0	4,5	0,45	0,29	45%	60%
Orig-t0	80	red-15	N3	10,2	15,7	38,8	4,6	0,46	0,29	45%	60%
Orig-t0	100	red-15	N3	10,3	15,9	38,6	4,8	0,46	0,30	45%	60%
Orig-t0	20	red-30	N3	9,9	15,2	39,1	4,4	0,44	0,29	45%	61%
Orig-t0	40	red-30	N3	10,2	15,7	38,8	4,6	0,46	0,30	44%	60%
Orig-t0	60	red-30	N3	10,4	16,2	38,4	5,0	0,48	0,31	44%	60%
Orig-t0	80	red-30	N3	10,6	16,8	38,0	5,3	0,50	0,32	44%	59%
Orig-t0	100	red-30	N3	10,9	17,4	37,5	5,7	0,52	0,33	43%	58%

Tabelle 29: Diverse gemittelte Kenngrößen aus Matrizenauswertungen

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	0 km ≤ FW < 5 km	5 km ≤ FW < 10 km	10 km ≤ FW < 15 km	15 km ≤ FW < 20 km	20 km ≤ FW < 25 km	25 km ≤ FW < 30 km	30 km ≤ FW < 35 km	35 km ≤ FW < 40 km	40 km ≤ FW < 45 km	FW > 45 km
Base	0	-	-	41,1%	23,1%	14,5%	8,6%	4,8%	2,8%	1,8%	1,2%	0,8%	1,3%
Intr	20	normal	N1	41,1%	23,2%	14,5%	8,5%	4,7%	2,8%	1,8%	1,2%	0,8%	1,3%
Intr	40	normal	N1	41,2%	23,2%	14,5%	8,5%	4,7%	2,7%	1,8%	1,2%	0,8%	1,3%
Intr	60	normal	N1	41,3%	23,2%	14,5%	8,5%	4,7%	2,7%	1,8%	1,2%	0,8%	1,3%
Esta	40	normal	N1	40,9%	23,0%	14,5%	8,6%	4,8%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Esta	60	normal	N1	40,9%	22,9%	14,5%	8,6%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Esta	80	normal	N1	40,7%	22,9%	14,5%	8,6%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Prev	60	normal	N1	40,8%	22,9%	14,5%	8,6%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Prev	80	normal	N1	40,7%	22,8%	14,5%	8,6%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Prev	100	normal	N1	40,7%	22,7%	14,5%	8,6%	4,9%	2,9%	2,0%	1,3%	0,9%	1,5%
Intr	20	normal	N2	41,2%	23,2%	14,4%	8,5%	4,7%	2,8%	1,8%	1,2%	0,8%	1,3%
Intr	40	normal	N2	41,3%	23,2%	14,4%	8,4%	4,7%	2,7%	1,8%	1,2%	0,8%	1,3%
Intr	60	normal	N2	41,6%	23,2%	14,4%	8,4%	4,7%	2,7%	1,8%	1,2%	0,8%	1,3%
Esta	40	normal	N2	40,8%	23,0%	14,5%	8,6%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Esta	60	normal	N2	40,7%	22,9%	14,5%	8,7%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Esta	80	normal	N2	40,5%	22,9%	14,5%	8,7%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Prev	60	normal	N2	40,6%	22,8%	14,6%	8,7%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Prev	80	normal	N2	40,4%	22,8%	14,6%	8,7%	4,9%	2,9%	2,0%	1,3%	0,9%	1,4%
Prev	100	normal	N2	40,3%	22,6%	14,6%	8,8%	5,0%	3,0%	2,0%	1,3%	0,9%	1,5%
Intr	20	normal	N3	41,2%	23,1%	14,4%	8,5%	4,7%	2,8%	1,8%	1,2%	0,8%	1,3%
Intr	40	normal	N3	41,3%	23,2%	14,4%	8,4%	4,7%	2,7%	1,8%	1,2%	0,8%	1,3%
Intr	60	normal	N3	41,6%	23,2%	14,4%	8,4%	4,7%	2,7%	1,8%	1,2%	0,8%	1,3%
Esta	40	normal	N3	41,2%	22,9%	14,4%	8,5%	4,8%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Esta	60	normal	N3	41,3%	22,8%	14,3%	8,5%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Esta	80	normal	N3	41,3%	22,7%	14,3%	8,5%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Prev	60	normal	N3	40,3%	22,9%	14,6%	8,8%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Prev	80	normal	N3	40,0%	22,8%	14,7%	8,8%	5,0%	3,0%	2,0%	1,3%	0,9%	1,4%
Prev	100	normal	N3	39,8%	22,7%	14,7%	8,9%	5,1%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Intr	20	red-15	N1	41,2%	23,1%	14,5%	8,5%	4,7%	2,8%	1,8%	1,3%	0,8%	1,4%
Intr	40	red-15	N1	41,2%	23,2%	14,4%	8,5%	4,7%	2,8%	1,8%	1,2%	0,8%	1,4%
Intr	60	red-15	N1	41,3%	23,1%	14,4%	8,4%	4,7%	2,8%	1,8%	1,2%	0,8%	1,4%
Esta	40	red-15	N1	40,9%	22,9%	14,5%	8,5%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Esta	60	red-15	N1	40,8%	22,8%	14,4%	8,5%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,5%
Esta	80	red-15	N1	40,8%	22,8%	14,4%	8,5%	4,8%	2,9%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Prev	60	red-15	N1	40,8%	22,8%	14,4%	8,5%	4,8%	2,9%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Prev	80	red-15	N1	40,7%	22,7%	14,4%	8,5%	4,8%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,6%
Prev	100	red-15	N1	40,6%	22,6%	14,4%	8,5%	4,8%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,6%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	0 km ≤ FW < 5 km	5 km ≤ FW < 10 km	10 km ≤ FW < 15 km	15 km ≤ FW < 20 km	20 km ≤ FW < 25 km	25 km ≤ FW < 30 km	30 km ≤ FW < 35 km	35 km ≤ FW < 40 km	40 km ≤ FW < 45 km	FW > 45 km
Base	0	-	-	41,1%	23,1%	14,5%	8,6%	4,8%	2,8%	1,8%	1,2%	0,8%	1,3%
Intr	20	red-15	N2	41,2%	23,1%	14,4%	8,5%	4,7%	2,8%	1,8%	1,3%	0,8%	1,4%
Intr	40	red-15	N2	41,4%	23,1%	14,3%	8,5%	4,7%	2,8%	1,8%	1,3%	0,8%	1,4%
Intr	60	red-15	N2	41,5%	23,0%	14,3%	8,4%	4,7%	2,8%	1,8%	1,3%	0,8%	1,4%
Esta	40	red-15	N2	40,7%	22,8%	14,4%	8,7%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Esta	60	red-15	N2	40,5%	22,7%	14,5%	8,7%	4,9%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Esta	80	red-15	N2	40,4%	22,5%	14,5%	8,7%	4,9%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,6%
Prev	60	red-15	N2	40,4%	22,7%	14,5%	8,7%	4,9%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Prev	80	red-15	N2	40,2%	22,5%	14,5%	8,8%	5,0%	3,0%	2,1%	1,4%	0,9%	1,6%
Prev	100	red-15	N2	40,1%	22,3%	14,5%	8,8%	5,0%	3,1%	2,1%	1,5%	1,0%	1,7%
Intr	20	red-15	N3	40,9%	23,1%	14,4%	8,6%	4,8%	2,8%	1,8%	1,3%	0,8%	1,4%
Intr	40	red-15	N3	40,7%	23,1%	14,5%	8,6%	4,9%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Intr	60	red-15	N3	40,6%	23,0%	14,6%	8,7%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Esta	40	red-15	N3	40,5%	22,8%	14,5%	8,7%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Esta	60	red-15	N3	40,3%	22,6%	14,5%	8,8%	5,0%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Esta	80	red-15	N3	40,2%	22,2%	14,6%	8,9%	5,1%	3,1%	2,0%	1,4%	0,9%	1,6%
Prev	60	red-15	N3	39,4%	22,6%	14,8%	9,0%	5,2%	3,1%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Prev	80	red-15	N3	39,0%	22,3%	14,9%	9,2%	5,3%	3,2%	2,1%	1,5%	1,0%	1,6%
Prev	100	red-15	N3	38,5%	22,0%	15,0%	9,3%	5,4%	3,3%	2,2%	1,5%	1,0%	1,7%
Intr	20	red-30	N1	41,2%	23,1%	14,4%	8,5%	4,7%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Intr	40	red-30	N1	41,3%	23,1%	14,3%	8,4%	4,7%	2,8%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Intr	60	red-30	N1	41,4%	23,0%	14,3%	8,3%	4,7%	2,8%	1,9%	1,3%	0,9%	1,5%
Esta	40	red-30	N1	40,9%	22,9%	14,3%	8,5%	4,8%	2,9%	2,0%	1,3%	0,9%	1,5%
Esta	60	red-30	N1	40,8%	22,7%	14,3%	8,4%	4,8%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,6%
Esta	80	red-30	N1	40,7%	22,7%	14,2%	8,4%	4,8%	3,0%	2,1%	1,4%	1,0%	1,7%
Prev	60	red-30	N1	40,7%	22,7%	14,3%	8,4%	4,8%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,6%
Prev	80	red-30	N1	40,7%	22,6%	14,2%	8,4%	4,8%	3,0%	2,1%	1,4%	1,0%	1,7%
Prev	100	red-30	N1	40,6%	22,5%	14,2%	8,4%	4,8%	3,0%	2,1%	1,5%	1,0%	1,8%
Intr	20	red-30	N2	41,2%	23,0%	14,4%	8,5%	4,8%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Intr	40	red-30	N2	41,3%	22,8%	14,3%	8,4%	4,8%	2,8%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Intr	60	red-30	N2	41,4%	22,8%	14,3%	8,4%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,5%
Esta	40	red-30	N2	40,6%	22,7%	14,4%	8,6%	4,9%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Esta	60	red-30	N2	40,4%	22,4%	14,4%	8,7%	5,0%	3,1%	2,1%	1,4%	0,9%	1,6%
Esta	80	red-30	N2	40,2%	22,2%	14,4%	8,7%	5,0%	3,1%	2,2%	1,5%	1,0%	1,8%
Prev	60	red-30	N2	40,3%	22,4%	14,4%	8,7%	5,0%	3,1%	2,1%	1,4%	1,0%	1,7%
Prev	80	red-30	N2	40,0%	22,2%	14,3%	8,7%	5,1%	3,2%	2,2%	1,5%	1,0%	1,8%
Prev	100	red-30	N2	39,9%	22,0%	14,2%	8,7%	5,1%	3,2%	2,3%	1,6%	1,0%	1,9%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	0 km ≤ FW < 5 km	5 km ≤ FW < 10 km	10 km ≤ FW < 15 km	15 km ≤ FW < 20 km	20 km ≤ FW < 25 km	25 km ≤ FW < 30 km	30 km ≤ FW < 35 km	35 km ≤ FW < 40 km	40 km ≤ FW < 45 km	FW > 45 km
Base	0	-	-	41,1%	23,1%	14,5%	8,6%	4,8%	2,8%	1,8%	1,2%	0,8%	1,3%
Intr	20	red-30	N3	40,6%	23,0%	14,5%	8,7%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Intr	40	red-30	N3	40,1%	22,9%	14,6%	8,8%	5,0%	2,9%	2,0%	1,3%	0,9%	1,4%
Intr	60	red-30	N3	39,8%	22,6%	14,7%	9,0%	5,1%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Esta	40	red-30	N3	40,0%	22,6%	14,6%	8,9%	5,1%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Esta	60	red-30	N3	39,5%	22,2%	14,7%	9,0%	5,2%	3,2%	2,1%	1,5%	1,0%	1,6%
Esta	80	red-30	N3	39,1%	21,7%	14,7%	9,2%	5,4%	3,3%	2,2%	1,5%	1,0%	1,8%
Prev	60	red-30	N3	38,6%	22,2%	14,9%	9,3%	5,4%	3,3%	2,2%	1,5%	1,0%	1,6%
Prev	80	red-30	N3	37,8%	21,8%	15,0%	9,5%	5,6%	3,4%	2,3%	1,6%	1,1%	1,8%
Prev	100	red-30	N3	37,2%	21,3%	15,1%	9,8%	5,9%	3,6%	2,4%	1,7%	1,1%	1,9%
Pr-Ex	60	normal	N4	40,3%	22,9%	14,7%	8,8%	5,0%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Pr-Ex	80	normal	N4	40,0%	22,9%	14,7%	8,8%	5,0%	3,0%	2,0%	1,3%	0,9%	1,4%
Pr-Ex	100	normal	N4	39,8%	22,7%	14,7%	8,9%	5,1%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Pr-Ex	60	red-15	N4	39,2%	22,7%	14,9%	9,1%	5,2%	3,1%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Pr-Ex	80	red-15	N4	38,8%	22,4%	14,9%	9,2%	5,3%	3,2%	2,1%	1,5%	1,0%	1,6%
Pr-Ex	100	red-15	N4	38,3%	22,2%	15,0%	9,3%	5,5%	3,3%	2,2%	1,5%	1,0%	1,7%
Pr-Ex	60	red-30	N4	38,3%	22,4%	15,0%	9,4%	5,4%	3,3%	2,2%	1,5%	1,0%	1,6%
Pr-Ex	80	red-30	N4	37,5%	22,0%	15,1%	9,6%	5,6%	3,4%	2,3%	1,6%	1,1%	1,8%
Pr-Ex	100	red-30	N4	36,8%	21,5%	15,2%	9,8%	5,9%	3,6%	2,5%	1,7%	1,1%	1,9%
Orig	20	red-15	N1	41,1%	23,1%	14,4%	8,5%	4,8%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig	40	red-15	N1	41,1%	23,0%	14,4%	8,5%	4,7%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig	60	red-15	N1	41,1%	23,0%	14,4%	8,5%	4,7%	2,8%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig	80	red-15	N1	41,1%	23,0%	14,4%	8,5%	4,7%	2,8%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig	100	red-15	N1	41,2%	22,9%	14,4%	8,5%	4,7%	2,8%	1,9%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig	20	red-30	N1	41,1%	23,0%	14,4%	8,5%	4,8%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig	40	red-30	N1	41,1%	23,0%	14,3%	8,4%	4,7%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig	60	red-30	N1	41,1%	22,9%	14,3%	8,4%	4,7%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig	80	red-30	N1	41,1%	22,8%	14,3%	8,3%	4,7%	2,9%	2,0%	1,4%	0,9%	1,6%
Orig	100	red-30	N1	41,2%	22,8%	14,2%	8,3%	4,7%	2,9%	2,0%	1,4%	0,9%	1,6%
Orig	20	red-15	N2	41,0%	23,1%	14,4%	8,5%	4,8%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig	40	red-15	N2	41,0%	23,0%	14,4%	8,6%	4,8%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig	60	red-15	N2	41,0%	22,9%	14,4%	8,6%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig	80	red-15	N2	41,0%	22,8%	14,4%	8,6%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig	100	red-15	N2	41,0%	22,7%	14,4%	8,5%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig	20	red-30	N2	41,0%	23,0%	14,4%	8,5%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig	40	red-30	N2	40,9%	22,8%	14,3%	8,5%	4,8%	2,9%	2,0%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig	60	red-30	N2	40,8%	22,7%	14,3%	8,5%	4,9%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	0 km ≤ FW < 5 km	5 km ≤ FW < 10 km	10 km ≤ FW < 15 km	15 km ≤ FW < 20 km	20 km ≤ FW < 25 km	25 km ≤ FW < 30 km	30 km ≤ FW < 35 km	35 km ≤ FW < 40 km	40 km ≤ FW < 45 km	FW > 45 km
Base	0	-	-	41,1%	23,1%	14,5%	8,6%	4,8%	2,8%	1,8%	1,2%	0,8%	1,3%
Orig	80	red-30	N2	40,8%	22,5%	14,3%	8,5%	4,9%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,6%
Orig	100	red-30	N2	40,9%	22,4%	14,2%	8,5%	4,9%	3,0%	2,1%	1,4%	1,0%	1,7%
Orig	20	red-15	N3	40,8%	23,1%	14,5%	8,6%	4,9%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig	40	red-15	N3	40,4%	23,0%	14,6%	8,7%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig	60	red-15	N3	40,1%	22,8%	14,7%	8,8%	5,0%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig	80	red-15	N3	40,0%	22,6%	14,7%	8,9%	5,1%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Orig	100	red-15	N3	39,8%	22,4%	14,7%	9,0%	5,1%	3,1%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Orig	20	red-30	N3	40,5%	22,9%	14,6%	8,7%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig	40	red-30	N3	39,8%	22,8%	14,7%	8,9%	5,1%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Orig	60	red-30	N3	39,4%	22,4%	14,8%	9,1%	5,2%	3,1%	2,1%	1,4%	0,9%	1,6%
Orig	80	red-30	N3	38,9%	22,1%	14,9%	9,3%	5,4%	3,2%	2,2%	1,5%	1,0%	1,6%
Orig	100	red-30	N3	38,4%	21,7%	14,9%	9,4%	5,5%	3,4%	2,2%	1,6%	1,0%	1,8%
Orig-t5	20	red-15	N1	41,1%	23,0%	14,4%	8,5%	4,8%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig-t5	40	red-15	N1	41,0%	23,0%	14,4%	8,5%	4,8%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig-t5	60	red-15	N1	41,0%	22,9%	14,4%	8,5%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig-t5	80	red-15	N1	41,0%	22,9%	14,4%	8,5%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig-t5	100	red-15	N1	41,0%	22,8%	14,4%	8,5%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig-t5	20	red-30	N1	41,1%	23,0%	14,4%	8,5%	4,8%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig-t5	40	red-30	N1	41,0%	22,9%	14,3%	8,5%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig-t5	60	red-30	N1	41,0%	22,7%	14,3%	8,5%	4,8%	2,9%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Orig-t5	80	red-30	N1	40,9%	22,7%	14,3%	8,5%	4,8%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,6%
Orig-t5	100	red-30	N1	40,9%	22,6%	14,2%	8,4%	4,8%	3,0%	2,0%	1,4%	1,0%	1,6%
Orig-t5	20	red-15	N2	41,0%	23,0%	14,5%	8,6%	4,8%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig-t5	40	red-15	N2	40,9%	22,9%	14,4%	8,6%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig-t5	60	red-15	N2	40,8%	22,8%	14,4%	8,6%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig-t5	80	red-15	N2	40,8%	22,8%	14,4%	8,7%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig-t5	100	red-15	N2	40,8%	22,6%	14,5%	8,6%	4,9%	2,9%	2,0%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig-t5	20	red-30	N2	40,9%	22,9%	14,4%	8,6%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig-t5	40	red-30	N2	40,7%	22,7%	14,4%	8,6%	4,9%	2,9%	2,0%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig-t5	60	red-30	N2	40,5%	22,6%	14,5%	8,7%	5,0%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,6%
Orig-t5	80	red-30	N2	40,4%	22,4%	14,4%	8,7%	5,0%	3,1%	2,1%	1,4%	0,9%	1,6%
Orig-t5	100	red-30	N2	40,3%	22,2%	14,4%	8,7%	5,0%	3,1%	2,1%	1,4%	1,0%	1,7%
Orig-t5	20	red-15	N3	40,6%	23,1%	14,5%	8,7%	4,9%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig-t5	40	red-15	N3	40,1%	23,1%	14,7%	8,8%	5,0%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig-t5	60	red-15	N3	39,7%	23,0%	14,8%	8,9%	5,0%	3,0%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig-t5	80	red-15	N3	39,5%	22,8%	14,9%	9,0%	5,1%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	0 km ≤ FW < 5 km	5 km ≤ FW < 10 km	10 km ≤ FW < 15 km	15 km ≤ FW < 20 km	20 km ≤ FW < 25 km	25 km ≤ FW < 30 km	30 km ≤ FW < 35 km	35 km ≤ FW < 40 km	40 km ≤ FW < 45 km	FW > 45 km
Base	0	-	-	41,1%	23,1%	14,5%	8,6%	4,8%	2,8%	1,8%	1,2%	0,8%	1,3%
Orig-t5	100	red-15	N3	39,1%	22,7%	15,0%	9,1%	5,2%	3,1%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Orig-t5	20	red-30	N3	40,2%	23,1%	14,7%	8,8%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig-t5	40	red-30	N3	39,3%	23,0%	14,8%	9,0%	5,1%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Orig-t5	60	red-30	N3	38,5%	22,8%	15,1%	9,2%	5,3%	3,1%	2,1%	1,4%	0,9%	1,5%
Orig-t5	80	red-30	N3	37,8%	22,6%	15,2%	9,4%	5,5%	3,3%	2,2%	1,5%	1,0%	1,6%
Orig-t5	100	red-30	N3	37,0%	22,3%	15,4%	9,7%	5,6%	3,4%	2,3%	1,5%	1,0%	1,8%
Orig-t0	20	red-15	N1	41,0%	23,1%	14,4%	8,5%	4,8%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig-t0	40	red-15	N1	41,0%	23,0%	14,4%	8,5%	4,8%	2,8%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig-t0	60	red-15	N1	40,9%	22,9%	14,5%	8,5%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig-t0	80	red-15	N1	40,9%	22,8%	14,4%	8,5%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig-t0	100	red-15	N1	40,9%	22,7%	14,4%	8,6%	4,8%	2,9%	2,0%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig-t0	20	red-30	N1	41,0%	22,9%	14,4%	8,5%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig-t0	40	red-30	N1	40,8%	22,8%	14,3%	8,5%	4,9%	2,9%	2,0%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig-t0	60	red-30	N1	40,7%	22,6%	14,3%	8,5%	4,9%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,6%
Orig-t0	80	red-30	N1	40,5%	22,6%	14,3%	8,5%	4,9%	3,1%	2,1%	1,4%	0,9%	1,6%
Orig-t0	100	red-30	N1	40,5%	22,4%	14,3%	8,5%	4,9%	3,1%	2,1%	1,5%	1,0%	1,7%
Orig-t0	20	red-15	N2	40,9%	23,0%	14,5%	8,6%	4,8%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig-t0	40	red-15	N2	40,8%	22,9%	14,5%	8,6%	4,8%	2,9%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig-t0	60	red-15	N2	40,6%	22,8%	14,6%	8,7%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig-t0	80	red-15	N2	40,5%	22,7%	14,6%	8,7%	4,9%	2,9%	2,0%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig-t0	100	red-15	N2	40,4%	22,7%	14,6%	8,7%	4,9%	3,0%	2,0%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig-t0	20	red-30	N2	40,7%	22,9%	14,5%	8,6%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig-t0	40	red-30	N2	40,4%	22,7%	14,5%	8,7%	5,0%	3,0%	2,0%	1,3%	0,9%	1,5%
Orig-t0	60	red-30	N2	40,1%	22,5%	14,6%	8,8%	5,1%	3,1%	2,1%	1,4%	0,9%	1,6%
Orig-t0	80	red-30	N2	39,8%	22,4%	14,6%	8,9%	5,1%	3,1%	2,1%	1,4%	0,9%	1,7%
Orig-t0	100	red-30	N2	39,6%	22,3%	14,6%	8,9%	5,1%	3,2%	2,2%	1,5%	1,0%	1,8%
Orig-t0	20	red-15	N3	40,5%	23,1%	14,6%	8,7%	4,9%	2,8%	1,9%	1,3%	0,8%	1,4%
Orig-t0	40	red-15	N3	40,0%	23,2%	14,7%	8,8%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig-t0	60	red-15	N3	39,5%	23,2%	14,9%	8,9%	5,0%	3,0%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig-t0	80	red-15	N3	39,2%	23,0%	14,9%	9,0%	5,1%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Orig-t0	100	red-15	N3	38,8%	22,9%	15,1%	9,1%	5,2%	3,1%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Orig-t0	20	red-30	N3	40,0%	23,2%	14,7%	8,8%	4,9%	2,9%	1,9%	1,3%	0,9%	1,4%
Orig-t0	40	red-30	N3	39,0%	23,3%	14,9%	9,0%	5,1%	3,0%	2,0%	1,4%	0,9%	1,5%
Orig-t0	60	red-30	N3	38,1%	23,1%	15,2%	9,3%	5,3%	3,1%	2,1%	1,4%	0,9%	1,5%
Orig-t0	80	red-30	N3	37,2%	22,9%	15,4%	9,5%	5,5%	3,3%	2,1%	1,5%	1,0%	1,6%
Orig-t0	100	red-30	N3	36,3%	22,8%	15,6%	9,7%	5,7%	3,4%	2,2%	1,5%	1,0%	1,7%

Tabelle 30: Fahrtweitenverteilung für Pkw-Wege (FW: Fahrtweite)

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	0 min ≤ FZ < 5 min	5 min ≤ FZ < 10 min	10 min ≤ FZ < 15 min	15 min ≤ FZ < 20 min	20 min ≤ FZ < 25 min	25 min ≤ FZ < 30 min	30 min ≤ FZ < 35 min	35 min ≤ FZ < 40 min	40 min ≤ FZ < 45 min	FZ > 45 min
Base	0	-	-	24,6%	19,8%	16,1%	12,5%	9,2%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,3%
Intr	20	normal	N1	24,6%	19,7%	16,2%	12,4%	9,1%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,4%
Intr	40	normal	N1	24,7%	19,7%	16,0%	12,4%	9,2%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,4%
Intr	60	normal	N1	24,7%	19,8%	16,1%	12,4%	9,1%	6,2%	3,9%	2,5%	1,8%	3,4%
Esta	40	normal	N1	24,5%	19,7%	16,1%	12,5%	9,3%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,3%
Esta	60	normal	N1	24,4%	19,7%	16,2%	12,6%	9,3%	6,3%	3,9%	2,6%	1,8%	3,2%
Esta	80	normal	N1	24,4%	19,7%	16,2%	12,5%	9,3%	6,3%	3,9%	2,6%	1,8%	3,2%
Prev	60	normal	N1	24,5%	19,6%	16,2%	12,5%	9,3%	6,3%	3,9%	2,6%	1,8%	3,2%
Prev	80	normal	N1	24,4%	19,7%	16,2%	12,6%	9,4%	6,3%	3,9%	2,6%	1,8%	3,1%
Prev	100	normal	N1	24,5%	19,6%	16,3%	12,5%	9,4%	6,4%	3,9%	2,6%	1,8%	3,0%
Intr	20	normal	N2	24,7%	19,7%	16,1%	12,4%	9,1%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,4%
Intr	40	normal	N2	24,7%	19,7%	16,0%	12,4%	9,1%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,5%
Intr	60	normal	N2	24,8%	19,8%	16,0%	12,3%	9,1%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,5%
Esta	40	normal	N2	24,5%	19,7%	16,1%	12,6%	9,3%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,2%
Esta	60	normal	N2	24,4%	19,7%	16,2%	12,6%	9,3%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,1%
Esta	80	normal	N2	24,3%	19,7%	16,3%	12,7%	9,4%	6,3%	3,9%	2,6%	1,8%	3,1%
Prev	60	normal	N2	24,4%	19,7%	16,2%	12,6%	9,4%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,1%
Prev	80	normal	N2	24,3%	19,6%	16,4%	12,7%	9,4%	6,3%	3,8%	2,6%	1,8%	3,0%
Prev	100	normal	N2	24,2%	19,8%	16,4%	12,7%	9,5%	6,3%	3,8%	2,6%	1,8%	2,9%
Intr	20	normal	N3	24,6%	19,7%	16,1%	12,4%	9,1%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,4%
Intr	40	normal	N3	24,8%	19,7%	16,0%	12,4%	9,1%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,5%
Intr	60	normal	N3	24,7%	19,8%	16,0%	12,3%	9,1%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,5%
Esta	40	normal	N3	24,5%	19,5%	16,0%	12,5%	9,3%	6,4%	4,0%	2,6%	1,9%	3,4%
Esta	60	normal	N3	24,4%	19,4%	16,1%	12,5%	9,3%	6,5%	4,0%	2,6%	1,9%	3,3%
Esta	80	normal	N3	24,4%	19,4%	16,0%	12,5%	9,4%	6,5%	4,0%	2,6%	1,9%	3,3%
Prev	60	normal	N3	24,3%	19,8%	16,4%	12,7%	9,4%	6,2%	3,8%	2,5%	1,8%	3,0%
Prev	80	normal	N3	24,2%	19,9%	16,5%	12,8%	9,5%	6,2%	3,8%	2,5%	1,8%	2,9%
Prev	100	normal	N3	24,2%	20,0%	16,5%	12,8%	9,5%	6,1%	3,8%	2,5%	1,7%	2,8%
Intr	20	red-15	N1	24,7%	19,7%	16,1%	12,4%	9,1%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,4%
Intr	40	red-15	N1	24,8%	19,7%	16,1%	12,3%	9,1%	6,2%	3,9%	2,5%	1,8%	3,5%
Intr	60	red-15	N1	24,8%	19,7%	16,0%	12,4%	9,1%	6,2%	3,9%	2,5%	1,8%	3,6%
Esta	40	red-15	N1	24,6%	19,6%	16,2%	12,5%	9,2%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,4%
Esta	60	red-15	N1	24,5%	19,7%	16,1%	12,5%	9,2%	6,3%	3,9%	2,6%	1,9%	3,3%
Esta	80	red-15	N1	24,5%	19,7%	16,2%	12,5%	9,2%	6,3%	3,9%	2,6%	1,9%	3,3%
Prev	60	red-15	N1	24,5%	19,7%	16,1%	12,5%	9,3%	6,3%	3,9%	2,6%	1,9%	3,3%
Prev	80	red-15	N1	24,5%	19,7%	16,2%	12,5%	9,3%	6,3%	3,9%	2,6%	1,9%	3,3%
Prev	100	red-15	N1	24,4%	19,7%	16,2%	12,5%	9,3%	6,3%	3,9%	2,6%	1,9%	3,3%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	0 min ≤ FZ < 5 min	5 min ≤ FZ < 10 min	10 min ≤ FZ < 15 min	15 min ≤ FZ < 20 min	20 min ≤ FZ < 25 min	25 min ≤ FZ < 30 min	30 min ≤ FZ < 35 min	35 min ≤ FZ < 40 min	40 min ≤ FZ < 45 min	FZ > 45 min
Base	0	-	-	24,6%	19,8%	16,1%	12,5%	9,2%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,3%
Intr	20	red-15	N2	24,6%	19,8%	16,0%	12,3%	9,1%	6,3%	3,9%	2,6%	1,8%	3,5%
Intr	40	red-15	N2	24,8%	19,6%	15,9%	12,3%	9,0%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,7%
Intr	60	red-15	N2	24,8%	19,6%	15,9%	12,2%	9,0%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,9%
Esta	40	red-15	N2	24,5%	19,7%	16,0%	12,5%	9,3%	6,3%	3,9%	2,6%	1,9%	3,4%
Esta	60	red-15	N2	24,4%	19,6%	16,1%	12,5%	9,3%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,4%
Esta	80	red-15	N2	24,4%	19,5%	16,1%	12,5%	9,2%	6,4%	4,0%	2,6%	1,9%	3,4%
Prev	60	red-15	N2	24,4%	19,6%	16,1%	12,5%	9,3%	6,3%	3,9%	2,6%	1,9%	3,4%
Prev	80	red-15	N2	24,3%	19,5%	16,1%	12,5%	9,3%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,4%
Prev	100	red-15	N2	24,2%	19,7%	16,1%	12,5%	9,3%	6,3%	3,9%	2,7%	1,9%	3,4%
Intr	20	red-15	N3	24,4%	19,6%	15,9%	12,4%	9,2%	6,4%	4,0%	2,6%	1,9%	3,5%
Intr	40	red-15	N3	24,4%	19,2%	15,7%	12,4%	9,2%	6,5%	4,1%	2,7%	1,9%	3,8%
Intr	60	red-15	N3	24,3%	19,1%	15,6%	12,3%	9,2%	6,6%	4,2%	2,7%	2,0%	4,0%
Esta	40	red-15	N3	24,2%	19,1%	15,7%	12,5%	9,4%	6,6%	4,2%	2,7%	2,0%	3,7%
Esta	60	red-15	N3	23,9%	18,8%	15,6%	12,5%	9,4%	6,8%	4,3%	2,8%	2,0%	3,8%
Esta	80	red-15	N3	23,7%	18,5%	15,4%	12,4%	9,5%	7,0%	4,4%	2,9%	2,1%	4,0%
Prev	60	red-15	N3	24,0%	19,1%	16,0%	12,7%	9,6%	6,6%	4,1%	2,7%	2,0%	3,4%
Prev	80	red-15	N3	23,7%	19,0%	15,9%	12,7%	9,7%	6,6%	4,2%	2,8%	2,0%	3,4%
Prev	100	red-15	N3	23,4%	19,1%	15,8%	12,7%	9,8%	6,7%	4,2%	2,9%	2,0%	3,5%
Intr	20	red-30	N1	24,7%	19,8%	16,1%	12,3%	9,1%	6,2%	3,9%	2,6%	1,8%	3,5%
Intr	40	red-30	N1	24,7%	19,7%	16,0%	12,3%	9,0%	6,2%	3,9%	2,5%	1,8%	3,7%
Intr	60	red-30	N1	24,8%	19,7%	16,0%	12,2%	8,9%	6,2%	3,9%	2,5%	1,9%	3,9%
Esta	40	red-30	N1	24,6%	19,7%	16,1%	12,4%	9,1%	6,2%	3,9%	2,6%	1,9%	3,5%
Esta	60	red-30	N1	24,6%	19,7%	16,1%	12,4%	9,1%	6,2%	3,9%	2,6%	1,9%	3,6%
Esta	80	red-30	N1	24,5%	19,7%	16,1%	12,4%	9,1%	6,2%	3,9%	2,6%	1,9%	3,7%
Prev	60	red-30	N1	24,5%	19,7%	16,1%	12,4%	9,1%	6,2%	3,9%	2,6%	1,9%	3,6%
Prev	80	red-30	N1	24,4%	19,7%	16,2%	12,3%	9,1%	6,2%	3,9%	2,6%	1,9%	3,6%
Prev	100	red-30	N1	24,4%	19,8%	16,1%	12,4%	9,0%	6,2%	3,9%	2,6%	1,9%	3,7%
Intr	20	red-30	N2	24,6%	19,7%	16,0%	12,2%	9,0%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,7%
Intr	40	red-30	N2	24,8%	19,5%	15,8%	12,1%	8,9%	6,3%	4,1%	2,7%	1,9%	4,0%
Intr	60	red-30	N2	24,8%	19,5%	15,6%	11,8%	8,8%	6,3%	4,1%	2,7%	1,9%	4,3%
Esta	40	red-30	N2	24,5%	19,6%	15,9%	12,3%	9,1%	6,3%	4,0%	2,7%	1,9%	3,7%
Esta	60	red-30	N2	24,4%	19,5%	15,9%	12,2%	9,1%	6,4%	4,1%	2,7%	2,0%	3,9%
Esta	80	red-30	N2	24,3%	19,5%	15,7%	12,2%	9,0%	6,4%	4,1%	2,8%	2,0%	4,1%
Prev	60	red-30	N2	24,3%	19,5%	15,9%	12,2%	9,1%	6,4%	4,1%	2,7%	2,0%	3,8%
Prev	80	red-30	N2	24,2%	19,4%	15,8%	12,2%	9,1%	6,4%	4,1%	2,8%	2,1%	4,0%
Prev	100	red-30	N2	24,1%	19,4%	15,8%	12,1%	9,0%	6,3%	4,1%	2,8%	2,1%	4,2%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	0 min ≤ FZ < 5 min	5 min ≤ FZ < 10 min	10 min ≤ FZ < 15 min	15 min ≤ FZ < 20 min	20 min ≤ FZ < 25 min	25 min ≤ FZ < 30 min	30 min ≤ FZ < 35 min	35 min ≤ FZ < 40 min	40 min ≤ FZ < 45 min	FZ > 45 min
Base	0	-	-	24,6%	19,8%	16,1%	12,5%	9,2%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,3%
Intr	20	red-30	N3	24,4%	19,3%	15,8%	12,4%	9,3%	6,5%	4,1%	2,7%	1,9%	3,7%
Intr	40	red-30	N3	24,2%	18,9%	15,3%	12,3%	9,3%	6,7%	4,3%	2,8%	2,0%	4,1%
Intr	60	red-30	N3	23,8%	18,5%	15,1%	12,2%	9,3%	6,9%	4,6%	3,0%	2,1%	4,6%
Esta	40	red-30	N3	23,8%	18,7%	15,4%	12,4%	9,4%	6,9%	4,4%	2,9%	2,1%	4,0%
Esta	60	red-30	N3	23,5%	18,1%	15,1%	12,3%	9,5%	7,1%	4,6%	3,1%	2,2%	4,4%
Esta	80	red-30	N3	23,1%	17,5%	14,7%	12,2%	9,6%	7,4%	4,9%	3,3%	2,4%	4,9%
Prev	60	red-30	N3	23,4%	18,5%	15,5%	12,6%	9,7%	6,9%	4,4%	2,9%	2,1%	4,0%
Prev	80	red-30	N3	23,1%	18,2%	15,2%	12,5%	9,8%	7,1%	4,6%	3,1%	2,3%	4,2%
Prev	100	red-30	N3	22,6%	18,0%	14,9%	12,4%	10,0%	7,2%	4,7%	3,2%	2,4%	4,5%
Pr-Ex	60	normal	N4	24,4%	19,9%	16,3%	12,7%	9,4%	6,2%	3,8%	2,5%	1,8%	3,0%
Pr-Ex	80	normal	N4	24,3%	20,0%	16,4%	12,7%	9,4%	6,2%	3,8%	2,5%	1,8%	2,9%
Pr-Ex	100	normal	N4	24,3%	20,0%	16,6%	12,8%	9,5%	6,1%	3,7%	2,5%	1,7%	2,7%
Pr-Ex	60	red-15	N4	23,8%	19,0%	16,1%	12,7%	9,7%	6,6%	4,1%	2,7%	2,0%	3,4%
Pr-Ex	80	red-15	N4	23,5%	18,9%	15,9%	12,8%	9,7%	6,7%	4,2%	2,8%	2,0%	3,5%
Pr-Ex	100	red-15	N4	23,1%	18,9%	15,9%	12,8%	9,9%	6,8%	4,3%	2,9%	2,1%	3,5%
Pr-Ex	60	red-30	N4	23,2%	18,2%	15,6%	12,7%	9,8%	6,9%	4,5%	3,0%	2,1%	4,0%
Pr-Ex	80	red-30	N4	22,7%	17,9%	15,3%	12,7%	10,0%	7,1%	4,6%	3,1%	2,3%	4,2%
Pr-Ex	100	red-30	N4	22,2%	17,6%	15,1%	12,7%	10,1%	7,3%	4,8%	3,3%	2,4%	4,5%
Orig	20	red-15	N1	24,6%	19,7%	16,1%	12,5%	9,1%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,4%
Orig	40	red-15	N1	24,7%	19,7%	16,1%	12,4%	9,1%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,4%
Orig	60	red-15	N1	24,6%	19,7%	16,1%	12,4%	9,1%	6,2%	3,9%	2,5%	1,8%	3,5%
Orig	80	red-15	N1	24,6%	19,9%	16,0%	12,3%	9,1%	6,2%	3,9%	2,5%	1,8%	3,6%
Orig	100	red-15	N1	24,7%	19,8%	16,1%	12,3%	9,1%	6,2%	3,9%	2,5%	1,8%	3,6%
Orig	20	red-30	N1	24,6%	19,8%	16,1%	12,3%	9,1%	6,3%	3,9%	2,6%	1,8%	3,5%
Orig	40	red-30	N1	24,7%	19,7%	16,1%	12,3%	9,0%	6,2%	3,9%	2,6%	1,8%	3,6%
Orig	60	red-30	N1	24,7%	19,7%	16,0%	12,3%	9,0%	6,2%	3,9%	2,6%	1,9%	3,7%
Orig	80	red-30	N1	24,7%	19,7%	16,0%	12,2%	8,9%	6,2%	3,9%	2,6%	1,9%	3,9%
Orig	100	red-30	N1	24,7%	19,8%	15,9%	12,1%	8,8%	6,1%	3,9%	2,6%	1,9%	4,0%
Orig	20	red-15	N2	24,6%	19,7%	16,1%	12,4%	9,1%	6,3%	3,9%	2,6%	1,8%	3,4%
Orig	40	red-15	N2	24,7%	19,6%	16,0%	12,4%	9,1%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,5%
Orig	60	red-15	N2	24,6%	19,6%	16,0%	12,3%	9,1%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,6%
Orig	80	red-15	N2	24,7%	19,6%	15,9%	12,2%	9,0%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,7%
Orig	100	red-15	N2	24,7%	19,6%	15,9%	12,2%	9,0%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,9%
Orig	20	red-30	N2	24,6%	19,7%	16,0%	12,3%	9,1%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,6%
Orig	40	red-30	N2	24,7%	19,5%	15,8%	12,2%	9,0%	6,3%	4,1%	2,7%	1,9%	3,8%
Orig	60	red-30	N2	24,6%	19,4%	15,8%	12,0%	8,9%	6,4%	4,1%	2,7%	2,0%	4,1%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	0 min ≤ FZ < 5 min	5 min ≤ FZ < 10 min	10 min ≤ FZ < 15 min	15 min ≤ FZ < 20 min	20 min ≤ FZ < 25 min	25 min ≤ FZ < 30 min	30 min ≤ FZ < 35 min	35 min ≤ FZ < 40 min	40 min ≤ FZ < 45 min	FZ > 45 min
Base	0	-	-	24,6%	19,8%	16,1%	12,5%	9,2%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,3%
Orig	80	red-30	N2	24,6%	19,5%	15,6%	11,9%	8,8%	6,3%	4,1%	2,8%	2,0%	4,4%
Orig	100	red-30	N2	24,6%	19,4%	15,6%	11,7%	8,7%	6,3%	4,2%	2,8%	2,0%	4,7%
Orig	20	red-15	N3	24,4%	19,6%	15,9%	12,4%	9,2%	6,4%	4,0%	2,6%	1,9%	3,5%
Orig	40	red-15	N3	24,3%	19,3%	15,8%	12,5%	9,3%	6,5%	4,1%	2,7%	1,9%	3,6%
Orig	60	red-15	N3	24,1%	19,0%	15,7%	12,4%	9,4%	6,6%	4,2%	2,8%	2,0%	3,8%
Orig	80	red-15	N3	24,0%	18,9%	15,6%	12,3%	9,4%	6,7%	4,3%	2,8%	2,0%	4,0%
Orig	100	red-15	N3	23,8%	18,8%	15,4%	12,2%	9,4%	6,8%	4,4%	2,9%	2,1%	4,2%
Orig	20	red-30	N3	24,3%	19,3%	15,8%	12,4%	9,3%	6,5%	4,1%	2,7%	1,9%	3,6%
Orig	40	red-30	N3	24,0%	18,9%	15,5%	12,5%	9,4%	6,7%	4,3%	2,8%	2,0%	4,0%
Orig	60	red-30	N3	23,6%	18,5%	15,1%	12,3%	9,5%	6,9%	4,5%	3,0%	2,2%	4,4%
Orig	80	red-30	N3	23,3%	18,0%	14,8%	12,2%	9,5%	7,1%	4,8%	3,1%	2,3%	4,9%
Orig	100	red-30	N3	23,0%	17,6%	14,4%	12,0%	9,6%	7,3%	5,0%	3,3%	2,4%	5,4%
Orig-t5	20	red-15	N1	24,6%	19,7%	16,2%	12,4%	9,1%	6,3%	3,9%	2,6%	1,8%	3,4%
Orig-t5	40	red-15	N1	24,6%	19,7%	16,0%	12,4%	9,2%	6,3%	4,0%	2,6%	1,8%	3,5%
Orig-t5	60	red-15	N1	24,6%	19,7%	16,0%	12,4%	9,1%	6,3%	3,9%	2,6%	1,9%	3,5%
Orig-t5	80	red-15	N1	24,6%	19,7%	16,0%	12,3%	9,1%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,6%
Orig-t5	100	red-15	N1	24,6%	19,7%	16,0%	12,2%	9,1%	6,2%	4,0%	2,6%	1,9%	3,7%
Orig-t5	20	red-30	N1	24,6%	19,7%	16,0%	12,4%	9,1%	6,3%	3,9%	2,6%	1,8%	3,5%
Orig-t5	40	red-30	N1	24,6%	19,6%	16,0%	12,3%	9,1%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,7%
Orig-t5	60	red-30	N1	24,6%	19,5%	15,9%	12,2%	9,1%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,9%
Orig-t5	80	red-30	N1	24,6%	19,6%	15,9%	12,1%	9,0%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	4,0%
Orig-t5	100	red-30	N1	24,6%	19,6%	15,8%	12,0%	8,9%	6,2%	4,0%	2,6%	2,0%	4,2%
Orig-t5	20	red-15	N2	24,6%	19,7%	16,0%	12,4%	9,1%	6,3%	4,0%	2,6%	1,8%	3,5%
Orig-t5	40	red-15	N2	24,6%	19,5%	16,0%	12,4%	9,2%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,6%
Orig-t5	60	red-15	N2	24,5%	19,5%	15,9%	12,3%	9,1%	6,4%	4,0%	2,6%	1,9%	3,7%
Orig-t5	80	red-15	N2	24,5%	19,4%	15,9%	12,3%	9,1%	6,4%	4,1%	2,7%	1,9%	3,8%
Orig-t5	100	red-15	N2	24,5%	19,4%	15,8%	12,2%	9,0%	6,4%	4,1%	2,7%	1,9%	3,9%
Orig-t5	20	red-30	N2	24,5%	19,6%	16,0%	12,3%	9,1%	6,4%	4,0%	2,6%	1,9%	3,6%
Orig-t5	40	red-30	N2	24,5%	19,3%	15,7%	12,2%	9,1%	6,4%	4,1%	2,7%	1,9%	3,9%
Orig-t5	60	red-30	N2	24,4%	19,2%	15,6%	12,1%	9,1%	6,5%	4,2%	2,8%	2,0%	4,2%
Orig-t5	80	red-30	N2	24,3%	19,1%	15,5%	11,9%	9,0%	6,5%	4,3%	2,9%	2,1%	4,6%
Orig-t5	100	red-30	N2	24,3%	19,0%	15,3%	11,8%	8,9%	6,5%	4,3%	2,9%	2,1%	4,9%
Orig-t5	20	red-15	N3	24,3%	19,5%	16,0%	12,5%	9,3%	6,4%	4,0%	2,6%	1,9%	3,5%
Orig-t5	40	red-15	N3	24,1%	19,1%	15,9%	12,6%	9,3%	6,6%	4,1%	2,7%	1,9%	3,7%
Orig-t5	60	red-15	N3	23,8%	18,9%	15,8%	12,6%	9,4%	6,7%	4,2%	2,8%	2,0%	3,8%
Orig-t5	80	red-15	N3	23,5%	18,7%	15,7%	12,5%	9,5%	6,8%	4,4%	2,8%	2,1%	4,0%

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	0 min ≤ FZ < 5 min	5 min ≤ FZ < 10 min	10 min ≤ FZ < 15 min	15 min ≤ FZ < 20 min	20 min ≤ FZ < 25 min	25 min ≤ FZ < 30 min	30 min ≤ FZ < 35 min	35 min ≤ FZ < 40 min	40 min ≤ FZ < 45 min	FZ > 45 min
Base	0	-	-	24,6%	19,8%	16,1%	12,5%	9,2%	6,3%	3,9%	2,5%	1,8%	3,3%
Orig-t5	100	red-15	N3	23,3%	18,5%	15,6%	12,4%	9,6%	6,9%	4,5%	2,9%	2,1%	4,2%
Orig-t5	20	red-30	N3	24,1%	19,2%	15,9%	12,5%	9,3%	6,5%	4,1%	2,7%	1,9%	3,7%
Orig-t5	40	red-30	N3	23,5%	18,7%	15,6%	12,6%	9,5%	6,8%	4,4%	2,9%	2,1%	4,0%
Orig-t5	60	red-30	N3	23,0%	18,1%	15,4%	12,6%	9,6%	7,1%	4,6%	3,0%	2,2%	4,5%
Orig-t5	80	red-30	N3	22,4%	17,6%	15,1%	12,5%	9,7%	7,3%	4,9%	3,2%	2,3%	5,0%
Orig-t5	100	red-30	N3	21,9%	17,0%	14,8%	12,3%	9,8%	7,6%	5,1%	3,4%	2,5%	5,6%
Orig-t0	20	red-15	N1	24,6%	19,7%	16,1%	12,4%	9,2%	6,3%	3,9%	2,6%	1,8%	3,4%
Orig-t0	40	red-15	N1	24,6%	19,6%	16,1%	12,4%	9,2%	6,3%	4,0%	2,6%	1,8%	3,5%
Orig-t0	60	red-15	N1	24,5%	19,6%	16,0%	12,4%	9,2%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,6%
Orig-t0	80	red-15	N1	24,5%	19,6%	16,0%	12,3%	9,1%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,7%
Orig-t0	100	red-15	N1	24,6%	19,5%	16,0%	12,2%	9,1%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,8%
Orig-t0	20	red-30	N1	24,6%	19,6%	16,0%	12,3%	9,1%	6,3%	4,0%	2,6%	1,8%	3,6%
Orig-t0	40	red-30	N1	24,5%	19,6%	15,9%	12,3%	9,1%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,8%
Orig-t0	60	red-30	N1	24,4%	19,4%	15,9%	12,2%	9,0%	6,3%	4,1%	2,7%	1,9%	4,1%
Orig-t0	80	red-30	N1	24,4%	19,4%	15,7%	12,1%	9,0%	6,3%	4,1%	2,7%	2,0%	4,3%
Orig-t0	100	red-30	N1	24,3%	19,4%	15,6%	12,0%	8,9%	6,3%	4,1%	2,8%	2,0%	4,6%
Orig-t0	20	red-15	N2	24,6%	19,6%	16,1%	12,4%	9,2%	6,4%	4,0%	2,6%	1,8%	3,5%
Orig-t0	40	red-15	N2	24,5%	19,5%	15,9%	12,4%	9,2%	6,3%	4,0%	2,6%	1,9%	3,6%
Orig-t0	60	red-15	N2	24,4%	19,5%	15,8%	12,3%	9,2%	6,4%	4,1%	2,7%	1,9%	3,8%
Orig-t0	80	red-15	N2	24,3%	19,3%	15,8%	12,3%	9,1%	6,5%	4,1%	2,7%	1,9%	3,9%
Orig-t0	100	red-15	N2	24,2%	19,3%	15,7%	12,2%	9,1%	6,5%	4,2%	2,7%	2,0%	4,1%
Orig-t0	20	red-30	N2	24,4%	19,6%	15,9%	12,3%	9,1%	6,4%	4,0%	2,7%	1,9%	3,7%
Orig-t0	40	red-30	N2	24,3%	19,2%	15,7%	12,2%	9,1%	6,5%	4,2%	2,8%	2,0%	4,1%
Orig-t0	60	red-30	N2	24,0%	18,9%	15,6%	12,0%	9,1%	6,6%	4,3%	2,9%	2,1%	4,5%
Orig-t0	80	red-30	N2	23,9%	18,7%	15,3%	11,9%	9,0%	6,6%	4,4%	3,0%	2,1%	5,0%
Orig-t0	100	red-30	N2	23,8%	18,6%	15,1%	11,7%	8,9%	6,6%	4,5%	3,1%	2,2%	5,4%
Orig-t0	20	red-15	N3	24,2%	19,6%	16,0%	12,5%	9,3%	6,4%	4,0%	2,6%	1,9%	3,5%
Orig-t0	40	red-15	N3	23,9%	19,2%	15,9%	12,6%	9,4%	6,5%	4,2%	2,7%	1,9%	3,7%
Orig-t0	60	red-15	N3	23,5%	19,0%	15,9%	12,6%	9,5%	6,7%	4,3%	2,8%	2,0%	3,9%
Orig-t0	80	red-15	N3	23,1%	18,8%	15,8%	12,6%	9,6%	6,8%	4,4%	2,9%	2,1%	4,1%
Orig-t0	100	red-15	N3	22,7%	18,5%	15,7%	12,6%	9,6%	7,0%	4,5%	2,9%	2,1%	4,3%
Orig-t0	20	red-30	N3	23,8%	19,3%	15,9%	12,5%	9,4%	6,6%	4,1%	2,7%	1,9%	3,7%
Orig-t0	40	red-30	N3	23,0%	18,8%	15,7%	12,7%	9,5%	6,8%	4,4%	2,9%	2,1%	4,1%
Orig-t0	60	red-30	N3	22,3%	18,2%	15,6%	12,6%	9,7%	7,1%	4,7%	3,1%	2,2%	4,5%
Orig-t0	80	red-30	N3	21,6%	17,7%	15,2%	12,6%	9,8%	7,4%	5,0%	3,3%	2,3%	5,1%
Orig-t0	100	red-30	N3	20,8%	17,2%	14,9%	12,6%	9,8%	7,7%	5,2%	3,5%	2,5%	5,7%

Tabelle 31: Fahrtzeitenverteilung für Pkw-Wege (FZ: Fahrtzeit)

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Region ohne Stadt	Stadt ohne Zentrum	Zentrum	S1	S2	S3	S4	Abweichung der Summe zu Base
Base	0	-	-	78,3	17,6	4,1	30,5	15,1	51,4	3,0	-
Intr	20	normal	N1	78,0	17,6	4,1	30,1	15,1	51,5	3,0	-0,4
Intr	40	normal	N1	77,7	17,5	4,1	29,7	15,0	51,5	3,0	-0,8
Intr	60	normal	N1	77,4	17,4	4,1	29,2	15,0	51,6	3,0	-1,1
Esta	40	normal	N1	79,0	17,9	4,1	31,6	15,2	51,2	3,0	+1,0
Esta	60	normal	N1	79,4	18,0	4,1	32,2	15,2	51,1	3,0	+1,5
Esta	80	normal	N1	79,7	18,1	4,1	32,8	15,2	50,9	3,0	+1,9
Prev	60	normal	N1	79,6	18,1	4,1	32,5	15,2	51,0	3,0	+1,7
Prev	80	normal	N1	80,0	18,2	4,1	33,2	15,2	50,8	3,0	+2,3
Prev	100	normal	N1	80,4	18,4	4,1	34,0	15,3	50,6	3,0	+2,9
Intr	20	normal	N2	77,9	17,5	4,0	30,0	14,8	51,5	3,0	-0,6
Intr	40	normal	N2	77,5	17,3	4,0	29,5	14,5	51,7	3,0	-1,2
Intr	60	normal	N2	77,0	17,2	4,0	29,1	14,3	51,8	3,0	-1,8
Esta	40	normal	N2	79,2	18,0	4,1	31,7	15,5	51,1	3,0	+1,3
Esta	60	normal	N2	79,7	18,2	4,2	32,3	15,8	50,9	3,0	+2,0
Esta	80	normal	N2	80,1	18,4	4,2	33,0	16,0	50,7	3,0	+2,7
Prev	60	normal	N2	79,9	18,3	4,2	32,7	15,9	50,8	3,0	+2,4
Prev	80	normal	N2	80,5	18,5	4,2	33,5	16,2	50,6	3,0	+3,3
Prev	100	normal	N2	81,1	18,8	4,3	34,3	16,5	50,3	3,0	+4,1
Intr	20	normal	N3	77,9	17,5	4,0	30,0	14,8	51,5	3,0	-0,6
Intr	40	normal	N3	77,5	17,3	4,0	29,5	14,6	51,7	3,0	-1,2
Intr	60	normal	N3	77,0	17,2	4,0	29,1	14,3	51,8	3,0	-1,8
Esta	40	normal	N3	78,3	17,8	4,1	31,8	15,6	49,8	3,0	+0,2
Esta	60	normal	N3	78,4	17,9	4,1	32,4	15,9	49,0	3,0	+0,3
Esta	80	normal	N3	78,4	18,0	4,1	33,1	16,1	48,3	3,0	+0,5
Prev	60	normal	N3	80,5	18,4	4,2	32,6	15,9	51,7	3,0	+3,2
Prev	80	normal	N3	81,3	18,7	4,3	33,4	16,1	51,7	3,0	+4,3
Prev	100	normal	N3	82,0	19,0	4,3	34,2	16,4	51,7	3,0	+5,3
Intr	20	red-15	N1	78,1	17,6	4,1	30,5	15,0	51,2	3,0	-0,2
Intr	40	red-15	N1	78,0	17,6	4,1	30,5	15,0	51,1	3,0	-0,4
Intr	60	red-15	N1	77,8	17,5	4,1	30,5	14,9	50,9	3,0	-0,6
Esta	40	red-15	N1	79,4	18,0	4,1	32,7	15,1	50,7	3,0	+1,5
Esta	60	red-15	N1	80,0	18,2	4,1	33,8	15,1	50,3	3,0	+2,2
Esta	80	red-15	N1	80,5	18,4	4,1	34,9	15,1	50,0	3,0	+3,0
Prev	60	red-15	N1	80,2	18,3	4,1	34,1	15,1	50,3	3,0	+2,5
Prev	80	red-15	N1	80,8	18,5	4,1	35,3	15,1	49,9	3,0	+3,3
Prev	100	red-15	N1	81,4	18,7	4,1	36,5	15,1	49,5	3,0	+4,1

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Region ohne Stadt	Stadt ohne Zentrum	Zentrum	S1	S2	S3	S4	Abweichung der Summe zu Base
Base	0	-	-	78,3	17,6	4,1	30,5	15,1	51,4	3,0	-
Intr	20	red-15	N2	78,1	17,6	4,1	30,5	15,1	51,2	3,0	-0,3
Intr	40	red-15	N2	77,9	17,5	4,0	30,5	15,0	50,9	3,0	-0,6
Intr	60	red-15	N2	77,7	17,4	4,0	30,4	15,0	50,7	3,0	-0,9
Esta	40	red-15	N2	79,8	18,2	4,2	32,9	16,2	50,2	3,0	+2,3
Esta	60	red-15	N2	80,6	18,5	4,2	34,1	16,8	49,5	3,0	+3,4
Esta	80	red-15	N2	81,3	18,9	4,3	35,3	17,3	48,9	3,0	+4,4
Prev	60	red-15	N2	80,9	18,7	4,2	34,5	17,0	49,4	3,0	+3,8
Prev	80	red-15	N2	81,7	19,0	4,3	35,8	17,6	48,7	3,0	+5,1
Prev	100	red-15	N2	82,5	19,4	4,3	37,2	18,2	48,0	2,9	+6,3
Intr	20	red-15	N3	78,7	17,7	4,1	30,4	15,0	52,1	3,0	+0,4
Intr	40	red-15	N3	79,1	17,7	4,1	30,2	14,8	52,9	3,0	+0,9
Intr	60	red-15	N3	79,5	17,7	4,1	30,1	14,7	53,6	2,9	+1,4
Esta	40	red-15	N3	80,0	18,2	4,2	32,5	15,9	50,9	3,0	+2,3
Esta	60	red-15	N3	80,9	18,5	4,2	33,6	16,4	50,6	2,9	+3,5
Esta	80	red-15	N3	81,8	18,8	4,3	34,7	16,8	50,4	2,9	+4,8
Prev	60	red-15	N3	83,1	19,0	4,4	33,8	16,4	53,4	2,9	+6,5
Prev	80	red-15	N3	84,8	19,5	4,5	35,1	16,8	54,0	2,9	+8,8
Prev	100	red-15	N3	86,5	20,0	4,6	36,4	17,3	54,6	2,8	+11,1
Intr	20	red-30	N1	78,3	17,7	4,1	31,0	15,0	51,0	3,0	+0,0
Intr	40	red-30	N1	78,4	17,7	4,1	31,5	14,9	50,7	3,0	+0,1
Intr	60	red-30	N1	78,4	17,7	4,0	32,0	14,8	50,3	3,0	+0,1
Esta	40	red-30	N1	79,9	18,2	4,1	33,9	15,0	50,2	3,0	+2,2
Esta	60	red-30	N1	80,7	18,4	4,1	35,5	15,0	49,6	3,0	+3,2
Esta	80	red-30	N1	81,5	18,7	4,1	37,2	15,0	49,0	3,0	+4,2
Prev	60	red-30	N1	81,0	18,5	4,1	35,9	15,0	49,6	3,0	+3,6
Prev	80	red-30	N1	81,8	18,8	4,1	37,7	15,0	49,0	3,0	+4,7
Prev	100	red-30	N1	82,6	19,1	4,0	39,4	15,0	48,3	3,0	+5,7
Intr	20	red-30	N2	78,4	17,7	4,1	31,0	15,3	50,9	3,0	+0,1
Intr	40	red-30	N2	78,5	17,7	4,1	31,4	15,5	50,3	3,0	+0,2
Intr	60	red-30	N2	78,5	17,7	4,1	31,9	15,8	49,7	3,0	+0,3
Esta	40	red-30	N2	80,6	18,5	4,2	34,1	16,8	49,4	3,0	+3,4
Esta	60	red-30	N2	81,7	19,0	4,3	36,0	17,7	48,4	3,0	+5,0
Esta	80	red-30	N2	82,8	19,5	4,4	37,8	18,6	47,3	3,0	+6,6
Prev	60	red-30	N2	82,1	19,1	4,3	36,4	17,9	48,2	3,0	+5,5
Prev	80	red-30	N2	83,2	19,7	4,4	38,4	18,9	47,1	3,0	+7,3
Prev	100	red-30	N2	84,4	20,1	4,5	40,5	19,8	45,8	2,9	+9,0

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Region ohne Stadt	Stadt ohne Zentrum	Zentrum	S1	S2	S3	S4	Abweichung der Summe zu Base
Base	0	-	-	78,3	17,6	4,1	30,5	15,1	51,4	3,0	-
Intr	20	red-30	N3	79,6	17,8	4,1	30,7	15,1	52,7	3,0	+1,5
Intr	40	red-30	N3	80,9	18,1	4,2	31,0	15,1	54,1	2,9	+3,1
Intr	60	red-30	N3	82,2	18,3	4,2	31,2	15,1	55,5	2,9	+4,8
Esta	40	red-30	N3	81,7	18,6	4,2	33,3	16,3	52,0	2,9	+4,5
Esta	60	red-30	N3	83,5	19,1	4,3	34,9	16,9	52,2	2,9	+7,0
Esta	80	red-30	N3	85,5	19,7	4,4	36,7	17,6	52,5	2,9	+9,6
Prev	60	red-30	N3	85,9	19,7	4,5	35,1	16,9	55,2	2,9	+10,1
Prev	80	red-30	N3	88,7	20,5	4,7	37,0	17,5	56,4	2,8	+13,8
Prev	100	red-30	N3	91,6	21,3	4,8	39,0	18,2	57,7	2,8	+17,7
Pr-Ex	60	normal	N4	80,6	18,4	4,2	32,7	15,9	51,7	3,0	+3,2
Pr-Ex	80	normal	N4	81,3	18,7	4,3	33,4	16,1	51,7	3,0	+4,3
Pr-Ex	100	normal	N4	82,1	19,0	4,3	34,3	16,4	51,7	3,0	+5,4
Pr-Ex	60	red-15	N4	83,4	19,1	4,4	33,9	16,4	53,4	3,2	+6,8
Pr-Ex	80	red-15	N4	85,1	19,6	4,5	35,2	16,8	54,0	3,2	+9,2
Pr-Ex	100	red-15	N4	86,9	20,2	4,6	36,5	17,3	54,6	3,2	+11,6
Pr-Ex	60	red-30	N4	86,4	19,8	4,5	35,3	16,9	55,2	3,2	+10,7
Pr-Ex	80	red-30	N4	89,3	20,6	4,7	37,2	17,6	56,6	3,3	+14,6
Pr-Ex	100	red-30	N4	92,4	21,5	4,9	39,2	18,3	57,9	3,3	+18,7
Orig	20	red-15	N1	78,5	17,7	4,1	31,0	15,1	51,1	3,0	+0,2
Orig	40	red-15	N1	78,6	17,8	4,1	31,5	15,0	50,9	3,0	+0,5
Orig	60	red-15	N1	78,8	17,8	4,1	32,0	15,0	50,7	3,0	+0,7
Orig	80	red-15	N1	78,9	17,9	4,1	32,4	15,0	50,4	3,0	+0,8
Orig	100	red-15	N1	79,0	17,9	4,1	32,9	15,0	50,1	3,0	+1,0
Orig	20	red-30	N1	78,7	17,8	4,1	31,6	15,0	50,9	3,0	+0,5
Orig	40	red-30	N1	79,1	17,9	4,1	32,6	15,0	50,5	3,0	+1,0
Orig	60	red-30	N1	79,4	18,0	4,0	33,6	14,9	50,0	3,0	+1,5
Orig	80	red-30	N1	79,8	18,1	4,0	34,6	14,9	49,5	3,0	+1,9
Orig	100	red-30	N1	80,1	18,2	4,0	35,6	14,8	49,0	3,0	+2,4
Orig	20	red-15	N2	78,6	17,7	4,1	31,0	15,4	51,0	3,0	+0,4
Orig	40	red-15	N2	78,8	17,8	4,1	31,6	15,7	50,5	3,0	+0,8
Orig	60	red-15	N2	79,0	17,9	4,1	32,1	16,0	50,1	3,0	+1,1
Orig	80	red-15	N2	79,2	18,0	4,1	32,6	16,2	49,6	3,0	+1,4
Orig	100	red-15	N2	79,4	18,1	4,1	33,1	16,5	49,1	2,9	+1,7
Orig	20	red-30	N2	78,9	17,9	4,1	31,6	15,7	50,6	3,0	+0,9
Orig	40	red-30	N2	79,5	18,1	4,2	32,7	16,3	49,8	3,0	+1,8
Orig	60	red-30	N2	80,0	18,3	4,2	33,7	16,8	49,0	3,0	+2,6

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Region ohne Stadt	Stadt ohne Zentrum	Zentrum	S1	S2	S3	S4	Abweichung der Summe zu Base
Base	0	-	-	78,3	17,6	4,1	30,5	15,1	51,4	3,0	-
Orig	80	red-30	N2	80,5	18,6	4,2	34,9	17,4	48,1	3,0	+3,3
Orig	100	red-30	N2	81,0	18,7	4,2	36,0	18,0	47,0	2,9	+3,9
Orig	20	red-15	N3	79,1	17,8	4,1	30,9	15,2	52,0	3,0	+1,1
Orig	40	red-15	N3	80,0	18,0	4,2	31,3	15,4	52,5	3,0	+2,2
Orig	60	red-15	N3	80,8	18,2	4,2	31,6	15,5	53,1	2,9	+3,2
Orig	80	red-15	N3	81,7	18,4	4,2	32,0	15,7	53,7	2,9	+4,3
Orig	100	red-15	N3	82,5	18,6	4,3	32,4	15,9	54,3	2,9	+5,4
Orig	20	red-30	N3	80,0	18,0	4,2	31,3	15,4	52,5	3,0	+2,2
Orig	40	red-30	N3	81,7	18,4	4,2	32,0	15,7	53,7	2,9	+4,4
Orig	60	red-30	N3	83,5	18,8	4,3	32,8	16,0	54,9	2,9	+6,7
Orig	80	red-30	N3	85,4	19,3	4,4	33,7	16,3	56,2	2,8	+9,1
Orig	100	red-30	N3	87,4	19,7	4,5	34,7	16,7	57,6	2,8	+11,7
Orig-t5	20	red-15	N1	78,6	17,7	4,1	31,1	15,1	51,2	3,0	+0,4
Orig-t5	40	red-15	N1	78,8	17,8	4,1	31,7	15,1	51,0	3,0	+0,7
Orig-t5	60	red-15	N1	79,1	17,9	4,1	32,2	15,0	50,8	3,0	+1,0
Orig-t5	80	red-15	N1	79,3	18,0	4,1	32,7	15,0	50,5	3,0	+1,3
Orig-t5	100	red-15	N1	79,5	18,0	4,1	33,3	15,0	50,3	3,0	+1,6
Orig-t5	20	red-30	N1	78,9	17,8	4,1	31,7	15,1	51,0	3,0	+0,8
Orig-t5	40	red-30	N1	79,5	18,0	4,1	32,9	15,0	50,6	3,0	+1,5
Orig-t5	60	red-30	N1	80,0	18,2	4,1	34,0	15,0	50,2	3,0	+2,3
Orig-t5	80	red-30	N1	80,6	18,3	4,1	35,2	15,0	49,8	3,0	+3,0
Orig-t5	100	red-30	N1	81,1	18,5	4,1	36,4	14,9	49,3	3,0	+3,6
Orig-t5	20	red-15	N2	78,7	17,8	4,1	31,1	15,4	51,0	3,0	+0,6
Orig-t5	40	red-15	N2	79,1	17,9	4,1	31,7	15,8	50,6	3,0	+1,1
Orig-t5	60	red-15	N2	79,4	18,0	4,2	32,3	16,1	50,3	3,0	+1,6
Orig-t5	80	red-15	N2	79,7	18,2	4,2	32,9	16,4	49,8	3,0	+2,1
Orig-t5	100	red-15	N2	80,0	18,3	4,2	33,4	16,7	49,4	3,0	+2,5
Orig-t5	20	red-30	N2	79,2	17,9	4,1	31,8	15,7	50,8	3,0	+1,3
Orig-t5	40	red-30	N2	80,1	18,3	4,2	33,0	16,4	50,1	3,0	+2,5
Orig-t5	60	red-30	N2	80,9	18,5	4,3	34,2	17,1	49,4	3,0	+3,7
Orig-t5	80	red-30	N2	81,7	18,8	4,3	35,5	17,7	48,6	3,0	+4,8
Orig-t5	100	red-30	N2	82,4	19,1	4,3	36,8	18,4	47,6	2,9	+5,8
Orig-t5	20	red-15	N3	79,3	17,9	4,1	30,9	15,3	52,1	3,0	+1,3
Orig-t5	40	red-15	N3	80,4	18,1	4,2	31,4	15,5	52,9	3,0	+2,7
Orig-t5	60	red-15	N3	81,5	18,3	4,2	31,8	15,7	53,6	3,0	+4,0
Orig-t5	80	red-15	N3	82,5	18,6	4,3	32,3	15,9	54,4	2,9	+5,4

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Region ohne Stadt	Stadt ohne Zentrum	Zentrum	S1	S2	S3	S4	Abweichung der Summe zu Base
Base	0	-	-	78,3	17,6	4,1	30,5	15,1	51,4	3,0	-
Orig-t5	100	red-15	N3	83,6	18,8	4,3	32,7	16,1	55,1	2,9	+6,7
Orig-t5	20	red-30	N3	80,4	18,1	4,2	31,4	15,5	52,9	3,0	+2,7
Orig-t5	40	red-30	N3	82,6	18,6	4,3	32,3	15,8	54,4	3,0	+5,5
Orig-t5	60	red-30	N3	84,9	19,1	4,4	33,2	16,3	56,0	2,9	+8,4
Orig-t5	80	red-30	N3	87,3	19,6	4,5	34,2	16,7	57,6	2,9	+11,4
Orig-t5	100	red-30	N3	89,8	20,2	4,7	35,3	17,1	59,4	2,8	+14,6
Orig-t0	20	red-15	N1	78,7	17,8	4,1	31,4	15,1	51,1	3,0	+0,5
Orig-t0	40	red-15	N1	79,1	17,9	4,1	32,2	15,0	50,8	3,0	+1,0
Orig-t0	60	red-15	N1	79,5	18,0	4,1	33,0	15,0	50,5	3,0	+1,5
Orig-t0	80	red-15	N1	79,8	18,1	4,1	33,7	15,0	50,2	3,0	+1,9
Orig-t0	100	red-15	N1	80,1	18,2	4,1	34,5	15,0	49,9	3,0	+2,4
Orig-t0	20	red-30	N1	79,2	17,9	4,1	32,3	15,0	50,9	3,0	+1,2
Orig-t0	40	red-30	N1	80,1	18,2	4,1	33,9	15,0	50,4	3,0	+2,4
Orig-t0	60	red-30	N1	81,0	18,4	4,1	35,6	14,9	49,9	3,0	+3,5
Orig-t0	80	red-30	N1	81,8	18,6	4,0	37,3	14,9	49,3	3,0	+4,5
Orig-t0	100	red-30	N1	82,6	18,8	4,0	39,1	14,9	48,4	3,0	+5,4
Orig-t0	20	red-15	N2	78,9	17,8	4,1	31,3	15,6	50,9	3,0	+0,8
Orig-t0	40	red-15	N2	79,4	18,0	4,2	32,1	16,1	50,4	3,0	+1,5
Orig-t0	60	red-15	N2	79,9	18,2	4,2	32,9	16,5	49,8	3,0	+2,2
Orig-t0	80	red-15	N2	80,3	18,3	4,2	33,7	17,0	49,2	3,0	+2,9
Orig-t0	100	red-15	N2	80,8	18,5	4,2	34,5	17,5	48,5	3,0	+3,4
Orig-t0	20	red-30	N2	79,6	18,1	4,2	32,2	16,1	50,6	3,0	+1,8
Orig-t0	40	red-30	N2	80,8	18,5	4,3	33,8	17,0	49,7	3,0	+3,6
Orig-t0	60	red-30	N2	81,9	18,9	4,3	35,5	18,0	48,6	3,0	+5,2
Orig-t0	80	red-30	N2	83,0	19,2	4,4	37,3	19,1	47,3	3,0	+6,6
Orig-t0	100	red-30	N2	83,9	19,5	4,4	39,1	20,1	45,6	2,9	+7,8
Orig-t0	20	red-15	N3	79,6	17,9	4,1	31,0	15,3	52,3	3,0	+1,6
Orig-t0	40	red-15	N3	80,8	18,2	4,2	31,5	15,5	53,2	3,0	+3,2
Orig-t0	60	red-15	N3	82,1	18,4	4,3	31,9	15,8	54,1	2,9	+4,8
Orig-t0	80	red-15	N3	83,3	18,7	4,3	32,4	16,0	55,0	2,9	+6,4
Orig-t0	100	red-15	N3	84,6	19,0	4,4	32,9	16,2	55,9	2,9	+8,0
Orig-t0	20	red-30	N3	80,9	18,2	4,2	31,5	15,5	53,2	3,0	+3,2
Orig-t0	40	red-30	N3	83,5	18,7	4,3	32,5	16,0	55,1	3,0	+6,5
Orig-t0	60	red-30	N3	86,1	19,3	4,5	33,5	16,5	57,0	2,9	+9,9
Orig-t0	80	red-30	N3	89,0	19,9	4,6	34,6	17,0	59,0	2,9	+13,5
Orig-t0	100	red-30	N3	91,9	20,6	4,8	35,8	17,5	61,1	2,8	+17,2

Tabelle 32: Aufteilung der Pkw-Fahrleistung auf Gebiete bzw. Straßenklassen in der Region Stuttgart aus der Netzauswertung

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Region ohne Stadt	Stadt ohne Zentrum	Zentrum	S1	S2	S3	S4	Abweichung der Summe zu Base
Base	0	-	-	71,7	21,3	6,9	19,3	16,9	54,8	9,0	-
Intr	20	normal	N1	71,8	21,3	6,9	19,3	16,9	54,9	9,0	+0,0
Intr	40	normal	N1	71,8	21,3	6,9	19,2	16,8	55,0	9,0	-0,0
Intr	60	normal	N1	71,7	21,3	6,9	19,1	16,7	55,1	9,0	-0,0
Esta	40	normal	N1	71,8	21,4	6,9	19,5	17,0	54,6	9,0	+0,1
Esta	60	normal	N1	71,8	21,4	7,0	19,6	17,1	54,4	9,0	+0,1
Esta	80	normal	N1	71,8	21,4	7,0	19,7	17,2	54,3	9,0	+0,1
Prev	60	normal	N1	71,8	21,4	7,0	19,6	17,1	54,4	9,0	+0,1
Prev	80	normal	N1	71,8	21,4	7,0	19,7	17,2	54,2	9,0	+0,1
Prev	100	normal	N1	71,7	21,4	7,0	19,8	17,3	53,9	9,0	+0,0
Intr	20	normal	N2	71,8	21,3	6,9	19,2	16,8	55,0	9,0	+0,0
Intr	40	normal	N2	71,8	21,3	6,9	19,1	16,7	55,3	9,0	-0,0
Intr	60	normal	N2	71,7	21,3	6,9	18,9	16,6	55,5	9,0	-0,1
Esta	40	normal	N2	71,8	21,4	6,9	19,6	17,1	54,4	9,0	+0,1
Esta	60	normal	N2	71,8	21,4	6,9	19,7	17,2	54,2	9,0	+0,1
Esta	80	normal	N2	71,7	21,4	6,9	19,8	17,3	53,9	9,0	+0,1
Prev	60	normal	N2	71,8	21,4	6,9	19,8	17,3	54,0	9,0	+0,1
Prev	80	normal	N2	71,7	21,4	6,9	20,0	17,4	53,7	9,0	+0,1
Prev	100	normal	N2	71,6	21,5	6,9	20,1	17,5	53,4	9,0	-0,0
Intr	20	normal	N3	71,8	21,3	6,9	19,2	16,8	55,0	9,0	+0,0
Intr	40	normal	N3	71,8	21,3	6,9	19,1	16,7	55,2	9,0	-0,0
Intr	60	normal	N3	71,7	21,3	6,9	18,9	16,6	55,5	9,0	-0,1
Esta	40	normal	N3	72,0	21,5	7,0	19,7	17,3	54,4	9,0	+0,4
Esta	60	normal	N3	72,0	21,6	7,0	19,9	17,5	54,1	9,0	+0,6
Esta	80	normal	N3	72,1	21,6	7,0	20,1	17,7	53,9	9,0	+0,7
Prev	60	normal	N3	71,6	21,4	6,9	19,7	17,1	54,0	9,0	-0,1
Prev	80	normal	N3	71,5	21,3	6,9	19,8	17,2	53,7	9,0	-0,3
Prev	100	normal	N3	71,3	21,3	6,9	20,0	17,3	53,4	8,9	-0,5
Intr	20	red-15	N1	71,9	21,4	6,9	19,7	16,8	54,7	9,0	+0,2
Intr	40	red-15	N1	72,0	21,4	6,9	20,1	16,7	54,5	9,0	+0,3
Intr	60	red-15	N1	72,1	21,5	6,9	20,4	16,7	54,4	9,0	+0,4
Esta	40	red-15	N1	72,0	21,4	6,9	20,4	17,0	54,0	9,0	+0,4
Esta	60	red-15	N1	72,1	21,5	6,9	20,8	17,0	53,6	9,0	+0,5
Esta	80	red-15	N1	72,2	21,5	6,9	21,3	17,1	53,2	9,0	+0,6
Prev	60	red-15	N1	72,1	21,5	6,9	20,9	17,1	53,5	9,0	+0,5
Prev	80	red-15	N1	72,2	21,5	6,9	21,4	17,1	53,1	9,0	+0,6
Prev	100	red-15	N1	72,2	21,6	6,9	21,8	17,2	52,7	9,0	+0,7

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Region ohne Stadt	Stadt ohne Zentrum	Zentrum	S1	S2	S3	S4	Abweichung der Summe zu Base
Base	0	-	-	71,7	21,3	6,9	19,3	16,9	54,8	9,0	-
Intr	20	red-15	N2	72,0	21,5	7,0	19,7	17,2	54,6	9,0	+0,4
Intr	40	red-15	N2	72,2	21,6	7,0	20,0	17,5	54,4	8,9	+0,9
Intr	60	red-15	N2	72,4	21,7	7,1	20,3	17,8	54,2	8,9	+1,2
Esta	40	red-15	N2	72,2	21,7	7,0	20,6	18,1	53,3	9,0	+0,9
Esta	60	red-15	N2	72,4	21,8	7,0	21,2	18,6	52,6	9,0	+1,3
Esta	80	red-15	N2	72,6	22,0	7,1	21,8	19,2	51,8	8,9	+1,6
Prev	60	red-15	N2	72,4	21,9	7,0	21,2	18,7	52,4	9,0	+1,3
Prev	80	red-15	N2	72,5	22,0	7,1	21,9	19,3	51,6	8,9	+1,6
Prev	100	red-15	N2	72,7	22,2	7,1	22,5	19,9	50,8	8,9	+1,9
Intr	20	red-15	N3	72,7	21,6	7,0	19,5	17,1	55,8	8,9	+1,3
Intr	40	red-15	N3	73,6	21,9	7,1	19,8	17,2	56,9	8,8	+2,7
Intr	60	red-15	N3	74,6	22,2	7,2	20,0	17,3	58,0	8,7	+4,0
Esta	40	red-15	N3	73,8	22,1	7,2	20,4	17,9	56,0	8,9	+3,1
Esta	60	red-15	N3	74,8	22,5	7,3	21,0	18,4	56,5	8,8	+4,7
Esta	80	red-15	N3	75,9	23,0	7,4	21,6	18,8	57,1	8,7	+6,3
Prev	60	red-15	N3	74,2	22,3	7,2	20,7	17,9	56,3	8,8	+3,7
Prev	80	red-15	N3	75,0	22,6	7,3	21,2	18,2	56,7	8,7	+4,8
Prev	100	red-15	N3	75,8	22,9	7,4	21,7	18,6	57,1	8,6	+6,0
Intr	20	red-30	N1	72,0	21,5	6,9	20,2	16,8	54,4	9,0	+0,4
Intr	40	red-30	N1	72,4	21,6	6,9	21,0	16,7	54,1	9,0	+0,8
Intr	60	red-30	N1	72,6	21,7	6,8	21,9	16,6	53,7	8,9	+1,2
Esta	40	red-30	N1	72,3	21,6	6,9	21,4	16,9	53,5	9,0	+0,8
Esta	60	red-30	N1	72,6	21,7	6,9	22,3	17,0	52,9	9,0	+1,2
Esta	80	red-30	N1	72,9	21,8	6,9	23,3	17,0	52,2	9,0	+1,5
Prev	60	red-30	N1	72,6	21,7	6,9	22,4	17,0	52,8	9,0	+1,2
Prev	80	red-30	N1	72,8	21,8	6,9	23,3	17,1	52,1	9,0	+1,5
Prev	100	red-30	N1	73,0	21,9	6,8	24,3	17,1	51,4	8,9	+1,8
Intr	20	red-30	N2	72,3	21,7	7,0	20,1	17,6	54,3	9,0	+1,0
Intr	40	red-30	N2	73,0	22,0	7,2	21,0	18,4	53,8	8,9	+2,1
Intr	60	red-30	N2	73,5	22,3	7,3	21,9	19,2	53,1	8,9	+3,2
Esta	40	red-30	N2	72,9	22,1	7,2	21,6	19,0	52,5	9,0	+2,1
Esta	60	red-30	N2	73,4	22,5	7,3	22,8	20,1	51,3	8,9	+3,2
Esta	80	red-30	N2	73,9	22,9	7,4	24,0	21,2	50,1	8,9	+4,2
Prev	60	red-30	N2	73,4	22,5	7,3	22,9	20,2	51,2	8,9	+3,1
Prev	80	red-30	N2	73,9	22,9	7,4	24,1	21,3	49,9	8,9	+4,1
Prev	100	red-30	N2	74,4	23,3	7,5	25,4	22,5	48,4	8,8	+5,1

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Region ohne Stadt	Stadt ohne Zentrum	Zentrum	S1	S2	S3	S4	Abweichung der Summe zu Base
Base	0	-	-	71,7	21,3	6,9	19,3	16,9	54,8	9,0	-
Intr	20	red-30	N3	73,6	22,0	7,1	19,9	17,3	56,6	8,9	+2,7
Intr	40	red-30	N3	75,6	22,6	7,3	20,5	17,7	58,6	8,8	+5,6
Intr	60	red-30	N3	77,7	23,3	7,6	21,2	18,2	60,6	8,7	+8,6
Esta	40	red-30	N3	75,8	22,8	7,4	21,2	18,4	57,5	8,8	+6,0
Esta	60	red-30	N3	78,0	23,6	7,7	22,3	19,3	59,0	8,7	+9,3
Esta	80	red-30	N3	80,3	24,6	8,0	23,4	20,2	60,6	8,6	+12,8
Prev	60	red-30	N3	77,2	23,3	7,5	21,9	18,8	58,6	8,7	+8,0
Prev	80	red-30	N3	79,1	24,0	7,8	22,9	19,4	59,9	8,6	+10,9
Prev	100	red-30	N3	81,0	24,8	8,0	24,0	20,1	61,2	8,5	+13,8
Pr-Ex	60	normal	N4	71,5	21,4	6,9	19,7	17,1	54,0	8,9	-0,2
Pr-Ex	80	normal	N4	71,4	21,3	6,9	19,9	17,2	53,7	8,8	-0,4
Pr-Ex	100	normal	N4	71,2	21,3	6,9	20,0	17,3	53,4	8,7	-0,6
Pr-Ex	60	red-15	N4	74,6	22,4	7,2	20,8	17,9	56,2	9,3	+4,2
Pr-Ex	80	red-15	N4	75,5	22,7	7,3	21,3	18,2	56,6	9,4	+5,6
Pr-Ex	100	red-15	N4	76,3	23,1	7,4	21,8	18,6	57,0	9,4	+6,8
Pr-Ex	60	red-30	N4	77,9	23,5	7,6	22,1	18,8	58,7	9,5	+9,1
Pr-Ex	80	red-30	N4	80,0	24,3	7,8	23,1	19,4	59,9	9,7	+12,2
Pr-Ex	100	red-30	N4	82,2	25,2	8,1	24,2	20,1	61,2	9,8	+15,4
Orig	20	red-15	N1	71,9	21,4	6,9	19,8	16,9	54,5	9,0	+0,2
Orig	40	red-15	N1	72,0	21,4	6,9	20,2	16,9	54,3	9,0	+0,3
Orig	60	red-15	N1	72,1	21,5	6,9	20,6	16,8	54,0	9,0	+0,5
Orig	80	red-15	N1	72,1	21,5	6,9	21,1	16,8	53,7	8,9	+0,6
Orig	100	red-15	N1	72,2	21,6	6,9	21,5	16,8	53,4	8,9	+0,6
Orig	20	red-30	N1	72,0	21,5	6,9	20,3	16,9	54,3	9,0	+0,4
Orig	40	red-30	N1	72,3	21,6	6,9	21,2	16,8	53,8	9,0	+0,8
Orig	60	red-30	N1	72,6	21,7	6,8	22,1	16,8	53,3	9,0	+1,2
Orig	80	red-30	N1	72,9	21,8	6,8	23,1	16,7	52,8	8,9	+1,6
Orig	100	red-30	N1	73,2	21,9	6,8	24,1	16,7	52,2	8,9	+1,9
Orig	20	red-15	N2	72,0	21,5	7,0	19,8	17,3	54,3	9,0	+0,4
Orig	40	red-15	N2	72,2	21,6	7,0	20,3	17,8	53,8	9,0	+0,9
Orig	60	red-15	N2	72,4	21,8	7,0	20,8	18,2	53,4	8,9	+1,3
Orig	80	red-15	N2	72,6	21,9	7,1	21,3	18,7	52,8	8,9	+1,6
Orig	100	red-15	N2	72,8	22,0	7,1	21,8	19,2	52,1	8,8	+1,9
Orig	20	red-30	N2	72,3	21,7	7,0	20,3	17,8	54,0	9,0	+1,1
Orig	40	red-30	N2	72,9	22,0	7,2	21,3	18,7	53,1	8,9	+2,1
Orig	60	red-30	N2	73,5	22,4	7,3	22,4	19,7	52,2	8,9	+3,2

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Region ohne Stadt	Stadt ohne Zentrum	Zentrum	S1	S2	S3	S4	Abweichung der Summe zu Base
Base	0	-	-	71,7	21,3	6,9	19,3	16,9	54,8	9,0	-
Orig	80	red-30	N2	74,1	22,8	7,4	23,6	20,7	51,1	8,8	+4,2
Orig	100	red-30	N2	74,6	23,1	7,5	24,8	21,8	49,9	8,8	+5,2
Orig	20	red-15	N3	72,7	21,7	7,0	19,7	17,2	55,6	8,9	+1,4
Orig	40	red-15	N3	73,6	22,0	7,1	20,0	17,4	56,4	8,8	+2,7
Orig	60	red-15	N3	74,5	22,3	7,2	20,4	17,7	57,2	8,8	+4,1
Orig	80	red-15	N3	75,5	22,6	7,3	20,8	17,9	58,0	8,7	+5,4
Orig	100	red-15	N3	76,4	23,0	7,4	21,2	18,2	58,9	8,6	+6,8
Orig	20	red-30	N3	73,6	22,0	7,1	20,0	17,4	56,4	8,9	+2,7
Orig	40	red-30	N3	75,6	22,6	7,3	20,8	18,0	58,0	8,8	+5,5
Orig	60	red-30	N3	77,6	23,4	7,6	21,6	18,5	59,7	8,7	+8,6
Orig	80	red-30	N3	79,8	24,2	7,8	22,5	19,1	61,6	8,6	+11,8
Orig	100	red-30	N3	82,2	25,1	8,1	23,5	19,8	63,7	8,4	+15,4
Orig-t5	20	red-15	N1	72,0	21,4	6,9	19,8	16,9	54,6	9,0	+0,3
Orig-t5	40	red-15	N1	72,2	21,5	6,9	20,4	16,9	54,4	9,0	+0,6
Orig-t5	60	red-15	N1	72,4	21,6	6,9	20,8	16,9	54,2	9,0	+0,9
Orig-t5	80	red-15	N1	72,6	21,6	6,9	21,3	16,9	53,9	9,0	+1,1
Orig-t5	100	red-15	N1	72,7	21,7	6,9	21,9	16,9	53,6	8,9	+1,3
Orig-t5	20	red-30	N1	72,3	21,5	6,9	20,4	16,9	54,4	9,0	+0,7
Orig-t5	40	red-30	N1	72,8	21,7	6,9	21,5	16,9	54,1	9,0	+1,4
Orig-t5	60	red-30	N1	73,3	21,9	6,9	22,6	16,9	53,7	9,0	+2,1
Orig-t5	80	red-30	N1	73,8	22,1	6,9	23,7	16,9	53,2	9,0	+2,8
Orig-t5	100	red-30	N1	74,4	22,3	6,9	25,0	16,9	52,7	8,9	+3,5
Orig-t5	20	red-15	N2	72,1	21,5	7,0	19,9	17,4	54,4	9,0	+0,7
Orig-t5	40	red-15	N2	72,5	21,7	7,0	20,4	17,9	54,0	9,0	+1,3
Orig-t5	60	red-15	N2	72,9	21,9	7,1	21,0	18,4	53,6	8,9	+1,9
Orig-t5	80	red-15	N2	73,2	22,1	7,2	21,6	18,9	53,1	8,9	+2,5
Orig-t5	100	red-15	N2	73,5	22,3	7,2	22,1	19,5	52,5	8,9	+3,0
Orig-t5	20	red-30	N2	72,7	21,8	7,1	20,5	17,9	54,2	9,0	+1,5
Orig-t5	40	red-30	N2	73,6	22,3	7,2	21,6	19,0	53,5	9,0	+3,1
Orig-t5	60	red-30	N2	74,5	22,8	7,4	22,9	20,1	52,8	8,9	+4,7
Orig-t5	80	red-30	N2	75,5	23,3	7,6	24,3	21,3	51,8	8,9	+6,3
Orig-t5	100	red-30	N2	76,4	23,8	7,7	25,7	22,6	50,7	8,8	+7,8
Orig-t5	20	red-15	N3	72,9	21,7	7,0	19,7	17,2	55,8	8,9	+1,7
Orig-t5	40	red-15	N3	74,1	22,1	7,2	20,2	17,6	56,8	8,9	+3,4
Orig-t5	60	red-15	N3	75,3	22,5	7,3	20,6	17,9	57,9	8,8	+5,2
Orig-t5	80	red-15	N3	76,6	22,9	7,4	21,0	18,2	58,9	8,8	+6,9

Fortsetzung auf nächster Seite

Szenariengruppe	AV-Anteil in %	Zeitwahrnehmung	AV-ready Netz	Region ohne Stadt	Stadt ohne Zentrum	Zentrum	S1	S2	S3	S4	Abweichung der Summe zu Base
Base	0	-	-	71,7	21,3	6,9	19,3	16,9	54,8	9,0	-
Orig-t5	100	red-15	N3	77,8	23,4	7,6	21,5	18,6	60,0	8,7	+8,7
Orig-t5	20	red-30	N3	74,2	22,1	7,2	20,2	17,5	56,8	8,9	+3,4
Orig-t5	40	red-30	N3	76,7	23,0	7,4	21,0	18,2	58,9	8,9	+7,1
Orig-t5	60	red-30	N3	79,3	23,9	7,7	22,0	18,9	61,2	8,8	+10,9
Orig-t5	80	red-30	N3	82,2	24,9	8,1	23,1	19,7	63,6	8,7	+15,1
Orig-t5	100	red-30	N3	85,3	26,0	8,4	24,2	20,6	66,3	8,6	+19,7
Orig-t0	20	red-15	N1	72,1	21,5	6,9	20,1	16,9	54,5	9,0	+0,5
Orig-t0	40	red-15	N1	72,5	21,6	6,9	20,8	16,9	54,2	9,0	+0,9
Orig-t0	60	red-15	N1	72,8	21,7	6,9	21,6	16,9	53,9	9,0	+1,4
Orig-t0	80	red-15	N1	73,1	21,8	6,9	22,3	16,9	53,6	9,0	+1,8
Orig-t0	100	red-15	N1	73,4	21,9	6,9	23,1	16,9	53,2	8,9	+2,2
Orig-t0	20	red-30	N1	72,6	21,6	6,9	20,9	16,9	54,3	9,0	+1,1
Orig-t0	40	red-30	N1	73,4	21,9	6,9	22,5	16,9	53,9	9,0	+2,2
Orig-t0	60	red-30	N1	74,3	22,2	6,9	24,1	16,9	53,4	9,0	+3,4
Orig-t0	80	red-30	N1	75,2	22,5	6,8	25,9	16,9	52,7	9,0	+4,6
Orig-t0	100	red-30	N1	76,1	22,8	6,8	27,9	17,0	51,9	9,0	+5,8
Orig-t0	20	red-15	N2	72,3	21,6	7,0	20,1	17,6	54,3	9,0	+1,0
Orig-t0	40	red-15	N2	72,9	21,9	7,1	20,8	18,4	53,7	9,0	+1,9
Orig-t0	60	red-15	N2	73,4	22,2	7,2	21,6	19,1	53,1	9,0	+2,8
Orig-t0	80	red-15	N2	73,9	22,4	7,3	22,4	19,9	52,5	8,9	+3,7
Orig-t0	100	red-15	N2	74,5	22,7	7,4	23,3	20,7	51,6	8,9	+4,5
Orig-t0	20	red-30	N2	73,1	22,0	7,1	20,9	18,4	54,0	9,0	+2,2
Orig-t0	40	red-30	N2	74,5	22,7	7,4	22,5	19,9	53,2	9,0	+4,6
Orig-t0	60	red-30	N2	75,9	23,4	7,7	24,2	21,7	52,1	9,0	+6,9
Orig-t0	80	red-30	N2	77,3	24,1	7,9	26,2	23,7	50,6	8,9	+9,3
Orig-t0	100	red-30	N2	78,8	24,8	8,1	28,3	25,7	48,7	8,9	+11,7
Orig-t0	20	red-15	N3	73,2	21,8	7,1	19,8	17,3	56,0	8,9	+2,0
Orig-t0	40	red-15	N3	74,6	22,2	7,2	20,2	17,7	57,3	8,9	+4,1
Orig-t0	60	red-15	N3	76,1	22,7	7,4	20,7	18,1	58,6	8,8	+6,2
Orig-t0	80	red-15	N3	77,5	23,2	7,5	21,2	18,5	59,9	8,7	+8,3
Orig-t0	100	red-15	N3	79,0	23,7	7,7	21,7	18,9	61,2	8,7	+10,5
Orig-t0	20	red-30	N3	74,7	22,3	7,2	20,3	17,7	57,3	8,9	+4,2
Orig-t0	40	red-30	N3	77,7	23,2	7,5	21,3	18,5	59,9	8,9	+8,5
Orig-t0	60	red-30	N3	80,9	24,3	7,9	22,3	19,3	62,7	8,8	+13,1
Orig-t0	80	red-30	N3	84,4	25,5	8,3	23,5	20,3	65,7	8,7	+18,2
Orig-t0	100	red-30	N3	88,1	26,8	8,7	24,8	21,3	68,9	8,6	+23,6

Tabelle 33: Aufteilung des Pkw-Zeitaufwands auf Gebiete bzw. Straßenklassen in der Region Stuttgart aus der Netzauswertung

Schriftenreihe des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen

Heft 1	1. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1986	9/1987
Heft 2	2. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1988	4/1989
Heft 3	Arbeiten aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen	7/1989
Heft 4	Beiträge zum Ruhenden Verkehr	8/1989
Heft 5	Festkolloquium anlässlich der Vollendung des 60. Lebensjahres von Prof. Dr.-Ing. Gerd Steierwald	5/1990
Heft 6	3. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1990	4/1991
Heft 7	Wolfgang Hertkorn Veränderungen des Kraftstoffverbrauchs und der Abgasbelastungen durch Geschwindigkeitsreduktion in untergeordneten städtischen Straßennetzen	2/1992
Heft 8	City Stuttgart - attraktive Innenstadt im Zentrum einer Agglomeration (Autofreie Innenstadt = Attraktive City?)	3/1992
Heft 9	Arbeiten aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen	4/1992
Heft 10	Reinhard Unkhoff Der Einfluß des Schwerverkehrs auf Geschwindigkeitsverhalten und Pulkbildung auf Autobahnen	6/1992
Heft 11	Stefanos Bazis Interaktiver Straßenentwurf mit Hilfe der EDV	7/1992
Heft 12	Jiann-Sheng Wu Stochastische Simulation des Überholverhaltens auf zweistreifigen Landstraßen	7/1992

Heft 13	4. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1992	5/1993
Heft 14	Stephan Herkt Abstimmung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage und knotenpunktfreien Strecken an innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen	4/1994
Heft 15	Von den Anfängen bis zur Gegenwart -Straßen- und Verkehrswesen an der Universität Stuttgart	9/1994
Heft 16	Ashraf Hamed Abwicklung des Lieferverkehrs innerörtlichen Hauptstraßen	10/1994
Heft 17	5. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1994	3/1995
Heft 18	Chronik und Retrospektive - Gerd Steierwald und das Institut für Straßen- und Verkehrswesen	10/1995
Heft 19	Heiko Tempel Zusammenhänge zwischen Verkehrsablauf, Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen im städtischen Busverkehr	11/1995
Heft 20	Volker Mörgenthaler Strategien zur Verminderung der Emissionen von Ozonvorläufersubstanzen des Nutzfahrzeugverkehrs in Ballungsgebieten	2/1996
Heft 21	Martin Schmid Auswirkungen der Kraftstoffbesteuerung auf die Pkw-Fahrleistungen im Freizeitverkehr	11/1996
Heft 22	Burkhard Flasche Fahrraumbewirtschaftung mit Sonderfahrstreifen für ausgewählte Stadtverkehre	2/1998
Heft 23	Szabolcs Törgyekes Ableitung spezifischer Abgas-Emissionsfaktoren für Kraftfahrzeugkollektive anhand von Konzentrationsmessungen in einem städtischen Straßentunnel	3/1998

Heft 24	Konrad von Kirchbach Zur Entwicklung der Straßen in Württemberg zwischen 1700 bis 1918	3/2000
Heft 25	6. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1999	3/2009
Heft 26	Symposium Stadt und Verkehr – Mobile Konferenz	11/1999
Heft 27	„Institut 21“ Aufbruch in Forschung und Lehre (nicht erschienen)	
Heft 28	Arbeiten aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen	7/2001
Heft 29	Stefan Denzinger Auswirkungen alternierender Telearbeit auf das Verkehrsverhalten	4/2001
Heft 30	7. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 2001	3/2009
Heft 31	Prof. Elisabeth Deakin Changing Importance of Central Cities	8/2002
Heft 32	Walter Vogt, Matthias Lenz, Henrik Schwarz, Wilhelm Glaser, Margrit Glaser, Thomas Kuder Verkehrliche Auswirkungen von Teleshopping und Telecommerce auf die Mobilität privater Haushalte	6/2002
Heft 33	Christoph Hecht Modellierung des Zeitwahlverhaltens im Personenverkehr	2/2005
Heft 34	Henrik Schwarz Vergleich von Schallimmissionsmessungen bei Straßenverkehrslärm mit Standardisierten und Binauralen Geräten	11/2002
Heft 35	Peter Schick Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses	6/2003

Heft 36	Volker Schmid Reaktivierte Nebenbahnen und alternative Buskonzepte Vergleich von ökologischen Wirkungen	7/2003
Heft 37	8. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 2003	3/2009
Heft 38	Matthias Lenz Auswirkungen des Ausbaus der verkehrlichen Infrastruktur auf das regionale Fernpendleraufkommen	2/2005
Heft 39	Steffen R. Herrmann Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaningverhalten auf Fahrbahnoberflächen	2/2008
Heft 40	Manuel Galster Modellierung von Anbindungen in Verkehrsplanungsmodellen	8/2009
Heft 41	10. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 2008	8/2009
Heft 42	Johannes Schlaich Nutzung von Mobilfunkdaten für die Analyse der Routenwahl	6/2010
Heft 43	Florian Bitzer Mikroskopische Modellierung und Simulation des Fußgängerverkehrs	9/2010
Heft 44	Eileen Mandir Potential of Traffic Information to optimize Route and Departure Time Choice	7/2012
Heft 45	Anne Wolff Simulation of Pavement Surface Runoff using the Depth-Averaged Shallow Water Equations	3/2013
Heft 46	Stefan Alber Veränderung des Schallabsorptionsverhaltens von offenporigen Asphalten durch Verschmutzung	3/2013

Heft 47	Thomas Otterstätter Methoden zur Erfassung von Verkehrsströmen und Fahrzeiten mit stationären fahrzeugwiedererkennenden Detektoren	8/2013
Heft 48	Bruno Arbter Numerische Bestimmung der akustischen Eigenschaften offenporiger Fahrbahnbeläge auf Basis ihrer rekonstruierten Geometrie	5/2014
Heft 49	Juliane Pillat Methoden zur Analyse und Prognose des Verkehrsaufkommens unter Berücksichtigung des Wetters auf Autobahnen	7/2014
Heft 50	Jochen Lohmiller Qualität des Verkehrsablaufs auf Netzabschnitten von Autobahnen - Bewertung unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit und Analyse von Einflussfaktoren	7/2014
Heft 51	Katrin Keller Modellierung und Optimierung des Verkehrsablaufs in Evakuierungssituationen	9/2014
Heft 52	Yaohua Xiong A Framework for Traffic Assignment with Explicit Route Generation	9/2014
Heft 53	Markus Weise Einflüsse der mikroskaligen Oberflächen- geometrie von Asphaltdeckschichten auf das Tribosystem Reifen-Fahrbahn	11/2015
Heft 54	Benjamin Rabenstein Öffentliche Fahrradverleihsysteme - Wirkungen und Potenziale	12/2015
Heft 55	Lu Liu Development of a Virtual City Model for Urban Land Use and Transport Planning	8/2016

Heft 56	Marcos Manuel Sánchez Von Straßenlängsprofilen zum Reifen- Fahrbahn-Geräusch: Ein Modell zur Analyse des Textureinflusses	7/2019
Heft 57	Charlotte Ritz Modellierung und Wirkung von Maßnahmen der städtischen Verkehrsplanung	5/2019
Heft 58	Matthias Schmaus Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des Personenverkehrs in langfristigen Energieszenarien auf kommunaler Ebene	8/2019
Heft 59	Maximilian Hartl Integrierte ÖV-Planung – Entwurf, Vergleich und Bewertung von planerischen und algorithmischen Lösungsverfahren	1/2020
Heft 60	Eric Pestel Qualität von Verkehrsnachfragemodellen	4/2021
Heft 61	Jörg Sonnleitner Abbildung der Eigenschaften automatisierter Fahrzeuge in makroskopischen Verkehrsnachfragemodelle	4/2022



ISSN 0932 - 402X
ISBN 978 - 3 - 9821138 - 2 - 1
D 93 (Dissertation der Universität Stuttgart)