

Universität Stuttgart

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

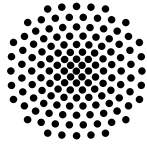
Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Friedrich

Integration geteilter Fahrzeugflotten in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle

Emely Richter

Veröffentlichungen aus dem
Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Heft 63 (Oktober 2022)



Universität Stuttgart

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

Integration geteilter Fahrzeugflotten in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle

Emely Richter

Veröffentlichungen aus dem
Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Heft 63 (Oktober 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.

Integration geteilter Fahrzeugflotten in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle

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

Vorgelegt von

Emely Richter

aus Göttingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch

Tag der mündlichen Prüfung: 28.10.2022

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

Universität Stuttgart

2022

Vorwort

Während meiner Zeit am Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik an der Universität Stuttgart, in der diese Arbeit entstanden ist, konnte ich mich glücklich schätzen, immer von hilfreichen und freundlichen Personen umgeben zu sein.

Ich möchte meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich danken, der mich in eine nochmal etwas andere Welt der Modellierung eingeführt hat als die, die ich bis dahin kannte. Auch in Bezug auf Lehre und einen guten Vortragsstil konnte ich viel von ihm lernen. Die gute Atmosphäre am Lehrstuhl wird nicht zuletzt durch ihn mitgestaltet.

Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch möchte ich für die Übernahme der Rolle des Mitberichters und für Denkanstöße aus Sicht der mikroskopischen Nachfragemodellierung danken.

Ferner gilt mein Dank allen am Lehrstuhl. Es gibt niemanden, der mir nicht mindestens einmal durch inhaltliche Diskussionen, Programmierkenntnisse oder beim Nehmen der (alltäglichen) Hürden des Unialltags geholfen hätte. Dabei sind insbesondere Manfred Wacker und Alice Lorenz zu nennen, die auf ihre Art ein unschlagbares Team bilden. Danke, dass ihr uns mit eurer Erfahrung im Unialltag stets zur Seite steht. Danke ebenfalls an Michael Veeck für die Hilfe bei einigen IT-seitigen Problemen.

Alle anderen Kollegen waren ebenso wichtig. Besonders Jörg Sonnleitner durch die thematisch enge Zusammenarbeit am Anfang unserer Zeit am Lehrstuhl, sowie Alexander Migl und Kea Seelhorst, die sich mit mir zusammen den Hürden des Bündelungsalgorithmus gestellt haben. Ich möchte Johann Hartl für die wertvolle Zusammenarbeit bei diversen Themen insbesondere bei Zeitintervallberechnungen und Umlaufbildung, sowie Magdalena Schilling für ihre Hilfe bei programmierspezifischen Fragen und besonders beim Runden danken. Matthias Schmaus und Eric Pestel haben mir durch gemeinsame Diskussionen zu modelltheoretischen Fragen aus so mancher Sackgasse geholfen. Joel Fischer danke ich für seine Unterstützung bei Erstellung der Erhebung. Stefanie Lenke für die wunderbaren Kaffeepausen und ihre Perspektive, Yannik Wohnsdorf für seine Gastfreundschaft und Jürgen Bawidamann für eine wunderbare Bürogemeinschaft, auch wenn meine Pflanzen manchmal ein bisschen auf die Probe gestellt wurden.

Mein abschließender Dank gilt meinen Eltern, vor allem, weil sie mir Freude am Lesen, Schreiben und an schönen Worten, am Diskutieren und Argumentieren und eine gewisse Kreativität mit auf den Weg gegeben haben. Und meinen lieben Lieblingsemenschen, die mir eine große Stütze sind. Ich hoffe, dass wir, wenn wir alt sind, alle gemeinsam auf der Veranda sitzen, über das Leben philosophieren und was wir alles erlebt haben.

Das nächste Buch wird dann ein Roman, der einen mitnimmt in fremde Welten mit ganz anderen Problemen, vielleicht mit ein paar zu bezähmenden Drachen und natürlich gibt es Magie. Aber dieses hier handelt nun erstmal von ganz weltlichen Problemen und es war vor allem der Bündelungsalgorithmus zu bezähmen. – Allerdings können halbe Personen Fahrrad fahren; ein bisschen Magie ist also doch im Spiel. Auf eine schöne Lektüre bei einer Tasse heißem Kakao und viel Spaß beim Lesen!

Emely Richter

Dieser Dissertation liegen Teile der „Studie zur Integration eines autonomen Ridesharingangebots in den ÖV im peri-urbanen Raum der Region Stuttgart“ im Auftrag des Verband Region Stuttgart im Rahmen des EU-Förderprojekts Dynaxibility4CE, sowie Teile des Forschungsprojekts ICARUS im Rahmen des EU-Programms Horizon 2020 und des Verbundforschungsprojekts AMEISE, gefördert vom Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, zugrunde.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein bei der Autorin.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	8
Abbildungsverzeichnis	10
Kurzfassung	15
Abstract	17
1 Einleitung	19
1.1 Hintergrund und Problemstellung	19
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	21
2 Einordnung und Grundlagen	23
2.1 Verkehrsnachfragemodelle	23
2.1.1 Diskrete Wahlmodelle	23
2.1.2 Parameterschätzung von Nutzenfunktionen	27
2.1.3 Modellstufen und Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage	29
2.1.4 Makroskopische und mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle	32
2.2 Systemeigenschaften geteilter Fahrzeugflotten	36
2.2.1 Modellierete Angebotsformen	36
2.2.2 Verkehrliche Kenngrößen des Angebots	39
2.2.3 Kosten	41
2.2.4 Weitere Kenngrößen und Zeitwertsätze	42
2.3 Sharingangebote in Verkehrsnachfragemodellen	43
2.4 Zusammenfassung und Abgrenzung der Arbeit	44
3 Erweiterung der Modellstruktur und Anwendung im Beispielmodell	47
3.1 Erweiterte Modellstruktur	47
3.2 Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart als Beispielanwendung	49
3.3 Grundlegende Erweiterung und Anpassung des Beispielmodells	49

4	Abbildung betrieblicher Entscheidungsprozesse	53
4.1	Anforderungen an die Modellierungsmethode	53
4.2	Fahrtenbündelung	56
4.2.1	Modellierungsmethode	56
4.2.2	Einfluss der maximalen Wartezeit auf Fahrzeuglastfahrtanzahl und Besetzungsgrad	61
4.2.3	Beispielrechnung zum Einfluss der makroskopischen Nachfragebetrachtung	66
4.2.4	Ansatz zu einer alternativen Berechnungsmethode für Fahrzeuglastfahrtanzahl und Restkapazität	70
4.3	Umlaufbildung	75
4.4	Ganzzahliges Runden von Nachfrage	77
4.5	Beispielanwendung	87
4.5.1	Einfluss von Rundung, Bündelungsgrenze und räumlicher Bündelung	88
4.5.2	Alternativer Ansatz zur Restkapazitätsberechnung	94
4.6	Zwischenfazit und Bewertung	98
5	Erweiterung der Moduswahl	101
5.1	Anforderungen an die Modellierungsmethode	101
5.2	Beispielhafte Erhebung und Modellschätzung	103
5.2.1	Umfragedesign	103
5.2.2	Stichprobe	106
5.2.3	Modellschätzung und Analyse der Ergebnisse	108
5.2.4	Zusammenfassung und Bewertung	112
5.3	Zwischenfazit	114
6	Erweiterung der Verkehrsmittel- und Verbindungswahl im öffentlichen Verkehr	115
6.1	Anforderungen an die Modellierungsmethode	115
6.2	Modellierungsmethode	118
6.3	Beispielanwendung	119
6.4	Zwischenfazit und Bewertung	124

7	Fallstudie im erweiterten Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart	125
7.1	Aufgabenstellung und Planungsraum	125
7.2	Szenarien und gewählte Berechnungsmethode	125
7.3	Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage und Fahrleistung	127
7.3.1	Modal-Split	127
7.3.2	Verkehrsmittelwahl im ÖV und Einfluss des ÖV-Angebotstyps	130
7.3.3	Fahrleistung	132
7.4	Auswirkungen auf den Betrieb	134
7.4.1	Flottengröße und Fahrzeugeinsatz	134
7.4.2	Kosten, Emissionen und Energieaufwand	136
7.5	Ridesharingspezifische Kenngrößen	139
7.6	Zwischenfazit und Bewertung	142
8	Fazit und Ausblick	145
	Literaturverzeichnis	151
	Abkürzungsverzeichnis	159
	Formelverzeichnis	161
	Anhang	165
Anhang 1	Runden: Differenzplots der Berechnungen ohne Zufallskomponente	165
Anhang 2	Erhebung: Umfragedesign	167
Anhang 3	Erhebung: Ergebnisse der erweiterten Parameterschätzung	179
Anhang 4	Erhebung: Verteilung der Merkmalskombinationen in der Stichprobe	183

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht ausgewählter diskreter Wahlmodelle der Logit-Familie.	25
Tabelle 2:	Verkehrsrelevante Entscheidungen und ihre Abbildung in Verkehrsmodellen des Personenverkehrs nach den EVNM-PV (FGSV (2022)) ergänzt um alternative gebräuchliche Bezeichnungen.	30
Tabelle 3:	Differenzierung des Abstraktions- und Aggregationsgrads mikroskopischer und makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle. Leicht angepasst und ergänzt sowie tabellarisch aufgearbeitet nach den EVNM-PV (FGSV (2022)).	34
Tabelle 4:	Verkehrliche Kenngrößen von Car- und Ridesharingangeboten. Eigene Zusammenstellung auf inhaltlicher Grundlage der H KRipoo (FGSV (2021)) und ergänzt um Angaben zu Sharingangebotsform und Messbarkeit im makroskopischen Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart (VRS-Modell, siehe Kapitel 3.2).	40
Tabelle 5:	Zusammenfassende Übersicht zu typischen Eingangs- und Ausgangsdaten der Bündelung und Umlaufbildung.	55
Tabelle 6:	Übersicht zur makroskopischen Bündelung.	60
Tabelle 7:	Übersicht zur makroskopischen Umlaufbildung.	75
Tabelle 8:	Anzahl Fahrzeuglast- und -leerfahrten im Betrachtungszeitraum von einem Tag sowie mittlere Fahrtweite je Last- und Leerfahrt eines Ridesharingfahrzeugs je Bündelungsszenario (Ganzzahlig/Rampenfunktion).	91
Tabelle 9:	Struktur der Erhebung.	105
Tabelle 10:	Ergebnisse der Parameterschätzung zur Moduswahl für ein Multinomiales Logit Modell mit Nutzenfunktionen entsprechend Formel (18).	109
Tabelle 11:	Zeitwertsätze entsprechend Parameterschätzung in Tabelle 10.	110
Tabelle 12:	Gruppenspezifische unbeobachtete Einflussfaktoren (qualitativ nach Anhang 3) entsprechend alternativenspezifischer Konstante β_{0i} . Rad wird jeweils als Referenz auf null gesetzt.	112
Tabelle 13:	Quelle-Ziel-Relationsfeine Typisierung des ÖV-Angebots im Anwendungsfall Schurwald entsprechend RICHTER ET AL. (2021).	120
Tabelle 14:	ÖV-Kenngrößen ausgewählter Relationen im Anwendungsfall Schurwald für den Bezugsfall S00 und das Szenario S01 mit in den ÖV integriertem Ridesharing (RICHTER ET AL. (2021)).	123
Tabelle 15:	Übersicht zu den in der Fallstudie berechneten Szenarien. Die Werte beziehen sich auf den Planungsraum. (nach RICHTER ET AL. (2021)).	126
Tabelle 16:	Anteil Leerfahrtkilometer, Besetzungsgrad und Umwegigkeit im Ridesharing je Szenario (nach RICHTER ET AL. (2021)).	139
Tabelle 17:	Auf Personenkilometer und Beförderungsfallanzahl je Fahrzeugtyp bezogene Kosten im Ridesharing und Busverkehr je Szenario und	

	Fahrzeugkonzept. Fahrzeugkonzept 2 ergibt sich als Kombination aus Buskosten des Konzepts 1 und Ridesharingkosten des Konzepts 3. Berechnet auf Grundlage der Ergebnisse von RICHTER ET AL. (2021).....	141
Tabelle 18:	Zuordnung der Fragensets nach Referenzweglänge und Pkw-Verfügbarkeit.....	173
Tabelle 19:	Attributausprägungen je Fragenset und Frage der Erhebung.....	175
Tabelle 20:	Ergebnisse der Parameterschätzung zur Moduswahl für ein Multinomiales Logit Modell mit erweiterter Nutzenfunktion.	181

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Um Abfahrtszeitwahl erweiterter Vier-Stufen-Algorithmus mit Rückkopplung zwischen Angebot und Nachfrage.	31
Abbildung 2: Beispielhafte Moduswahl mit Sharingangeboten in Konkurrenz zum ÖV (links) oder in den ÖV integriert (rechts).....	37
Abbildung 3: Erweiterung und Anpassung der Modellstruktur (vgl. Abbildung 1, S. 31) zur Integration von Sharingangeboten (grau hinterlegt).....	47
Abbildung 4: Untersuchungsraum Region Stuttgart und Planungsraum Schurwald im VRS-Modell.....	50
Abbildung 5: Räumliche Disaggregation des Planungsraums Schurwald (nach RICHTER ET AL. (2021)).....	51
Abbildung 6: Aufbereitung von Routen der Personennachfrage für die Bündelung in Fahrzeuglastfahrten auf Ebene von Verkehrszellen (RICHTER ET AL. (2019)).....	57
Abbildung 7: Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten in Abhängigkeit der Personennachfrage entsprechend makroskopischer Rampenfunktion (Formel (8)). Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen. ...	59
Abbildung 8: Erwartungswert der Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten, um die gegebene, im Betrachtungszeitraum gleichverteilte Personennachfrage vollständig zu bedienen. Szenarien für maximale Fahrgastwartezeiten bei einem Betrachtungszeitraum von 60 Minuten und einer Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen.	64
Abbildung 9: Durchschnittlicher Besetzungsgrad je benötigter Fahrzeuglastfahrt entsprechend Abbildung 8. Betrachtungszeitraum von 60 Minuten und Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen.	64
Abbildung 10: Verteilung der mittleren Personennachfrage über die untersuchten Nachfragevariationen.....	68
Abbildung 11: Mittlere Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten zum Bedienen der gegebenen Nachfragevariation bei einer Fahrzeugkapazität von 3 Fahrgästen. Für die mikroskopische Berechnung werden die Ergebnisse einzelner Nachfragevariationen sowie der Mittelwert der benötigten Fahrzeuglastfahrten über alle Nachfragevariationen mit dieser mittleren Personennachfrage angegeben.	69
Abbildung 12: Mittlerer Besetzungsgrad der entsprechend Abbildung 11 benötigten Fahrzeuglastfahrten bei einer Fahrzeugkapazität von 3 Fahrgästen.....	69
Abbildung 13: Erwartungswert der Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten je Zeitintervall, um die gegebene, im Betrachtungszeitraum auf Zeitintervalle gleichverteilte Personennachfrage vollständig zu bedienen, entsprechend Abbildung 8, S. 63. Ergänzt um makroskopische Rampenfunktion (Formel (8), S. 57). Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen.	71

Abbildung 14: Aufschlüsselung der in Abbildung 13 dargestellten Graphen zur Bestimmung des Erwartungswerts der Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten in Abhängigkeit der Personennachfrage. Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen.....	72
Abbildung 15: Visualisierung dreidimensionaler Nachfrage.....	77
Abbildung 16: Anzahl der Relationen mit Ridesharing-Personennachfrage je Nachfrageklasse und Zeitintervall in Beispielnachfragestruktur mit geringer Nachfrage (entnommen aus Fallstudie Kapitel 7). Nachfrageklassierung nach Größe der Personennachfrage je Quelle-Ziel-Relation und Zeitintervall.	78
Abbildung 17: Visualisierung der Schritte zur Nachfragerundung: 1. Quelle-Ziel-Relationen der Tagesmatrix, 2. Relationspezifische Tagesganglinie.....	79
Abbildung 18: Algorithmus zur ganzzahligen Rundung von Nachfrage: Erster Rundungsschritt auf Ebene der Tagesnachfrage.....	80
Abbildung 19: Algorithmus zur ganzzahligen Rundung von Nachfrage: Zweiter Rundungsschritt auf Ebene der Zeitintervalle.	82
Abbildung 20: Beispielnachfragestruktur mit geringer Nachfrage (entnommen aus Fallstudie Kapitel 7) makroskopisch und gerundet. Indizierung von Quell- und Zielverkehrszelle sind nicht identisch, da jeweils nach Quell- bzw. Zielverkehrsaufkommen sortiert wurde.	84
Abbildung 21: Differenzplots makroskopischer und gerundeter Nachfrage entsprechend Abbildung 20. Die Differenz der Gesamtnachfrage liegt bei weniger als einem Personenweg.	85
Abbildung 22: Beispielnachfragestruktur mit hoher Nachfrage makroskopisch und gerundet. Indizierung von Quell- und Zielverkehrszelle sind nicht identisch, da jeweils nach Quell- bzw. Zielverkehrsaufkommen sortiert wurde.	86
Abbildung 23: Differenzplots makroskopischer und gerundeter Nachfrage entsprechend Abbildung 22. Die Differenz der Gesamtnachfrage liegt bei weniger als einem Personenweg.....	87
Abbildung 24: Tagesfahrleistung durch Ridesharing-Last- und -Leerfahrten sowie benötigte Flottengröße je Bündelungsszenario (Ganzzahlig/Rampenfunktion).....	89
Abbildung 25: Summe der Ridesharing-Personennachfrage je Nachfrageklasse und Zeitintervall. Nachfrageklassierung nach Größe der Personennachfrage je Quelle-Ziel-Relation und Zeitintervall.	90
Abbildung 26: Anzahl der benötigten Lastfahrten je Zeitintervall und Bündelungsszenario (Ganzzahlig/Rampenfunktion).	91
Abbildung 27: Bündelungsgrad (Quotient aus Personenwegen und Fahrzeuglastfahrten) je Zeitintervall und Bündelungsszenario (Ganzzahlig/Rampenfunktion).....	92

Abbildung 28: Illustration des Rechenbeispiels zum Einfluss räumlicher Bündelung bei der Rundung von Nachfrage.....	93
Abbildung 29: Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten in Abhängigkeit der Personennachfrage je Zeitintervall (Angepasste Funktion für alternativen Berechnungsansatz sowie zugrundeliegende Erwartungswerte und Rampenfunktion).	96
Abbildung 30: Abweichung der Funktionswerte der angepassten Funktion des alternativen Ansatzes zu zugrundeliegenden Erwartungswerten entsprechend Abbildung 29.	96
Abbildung 31: Tagesfahrleistung durch Ridesharing-Last- und -Leerfahrten sowie benötigte Flottengröße je Bündelungsszenario (Ganzzahlig/Rampenfunktion/Alternative Berechnung).	97
Abbildung 32: Anzahl der benötigten Lastfahrten je Zeitintervall und Bündelungsszenario (Ganzzahlig/Rampenfunktion/Alternative Berechnung).	98
Abbildung 33: Screenshot einer Entscheidungssituation der Erhebung.	104
Abbildung 34: Stichprobenverteilung nach Geschlecht und Alter (Kategorie 0 entspricht keiner Angabe). n = 187.	106
Abbildung 35: Stichprobenverteilung nach Pkw-Verfügbarkeit und Einwohneranzahl des Wohnorts (Kategorie 0 entspricht keiner Angabe). n = 187.	107
Abbildung 36: Anzahl Referenzwege nach Modus und Wegezweck. n = 187.	107
Abbildung 37: Beispielhafte Darstellung zeitlicher Integration von Ridesharing in den ÖV (Zeitraum 04:30 Uhr bis 07:15 Uhr). Oben-links: fahrplangebundener ÖV, oben-rechts: fahrplangebundener ÖV ergänzt um Ridesharing-Zubringer, unten-links: fahrplangebundener ÖV ergänzt um Ridesharing-Zubringer und direktes Ridesharing (ganztägig), unten-rechts: fahrplangebundener ÖV ergänzt um Ridesharing-Zubringer und direktes Ridesharing (04:30 Uhr bis Betriebsbeginn S-Bahn).	117
Abbildung 38: Ausschnitt Berechnungsablauf für in den ÖV integriertes Ridesharing.	119
Abbildung 39: Ridesharing-Zubringer-Verbindungen im Anwendungsfall Schurwald (nach RICHTER ET AL. (2021)).	121
Abbildung 40: Ridesharing-Haltepunkte sowie Zu- und Abgangswege im Anwendungsfall Schurwald für Szenarien mit maximaler Zu- und Abgangsweite von 500 Meter Luftlinie (nach RICHTER ET AL. (2021)). ..	122
Abbildung 41: In Bezug auf ÖV-Angebotsänderungen untersuchte Relationen (nach RICHTER ET AL. (2021)).	123
Abbildung 42: Verkehrsleistungsbezogener Modal-Split für Wege des Quell-, Ziel- und Binnenverkehrs des Schurwalds je Szenario (RICHTER ET AL. (2021)).	129

Abbildung 43: Verkehrsleistungsbezogener Modal-Split für Wege des Binnenverkehrs im Schurwald (RICHTER ET AL. (2021)).	129
Abbildung 44: Verkehrsmittelwahl je Personenweg im ÖV für Wege des Quell-, Ziel- und Binnenverkehrs des Schurwalds (RICHTER ET AL. (2021)).	131
Abbildung 45: Verkehrsmittelwahl je Personenweg im ÖV für Wege des Binnenverkehrs des Schurwalds (RICHTER ET AL. (2021)).	131
Abbildung 46: Verkehrsaufkommensbezogener Modal-Split für Personenwege des Quell-, Ziel- und Binnenverkehrs des Schurwalds im Bezugsfall S00 und Szenario S01 (RS 15') je relationsspezifischem ÖV-Angebotstyp (RICHTER ET AL. (2021)). ÖV-Anteil ist grau hinterlegt.	132
Abbildung 47: Im Quell-, Ziel- und Binnenverkehr des Schurwalds erzeugte Fahrzeugkilometer von Ridesharingfahrzeugen und privaten Pkw (RICHTER ET AL. (2021)).	133
Abbildung 48: Im Binnenverkehr des Schurwalds erzeugte Fahrzeugkilometer von Ridesharingfahrzeugen und privaten Pkw (RICHTER ET AL. (2021)).	134
Abbildung 49: Einsatzkilometer (Graph) und benötigte Fahrzeuganzahl (Tabelle) je Szenario (nach RICHTER ET AL. (2021)).	135
Abbildung 50: Kosten der ÖV-Fahrzeugflotte pro Tag je Fahrzeugkonzept und Szenario (RICHTER ET AL. (2021)).	137
Abbildung 51: Energieaufwand der ÖV-Fahrzeugflotte pro Tag je Fahrzeugkonzept und Szenario (nach RICHTER ET AL. (2021)).	138
Abbildung 52: CO ₂ -Emissionen der ÖV-Fahrzeugflotte pro Tag je Fahrzeugkonzept und Szenario (nach RICHTER ET AL. (2021)).	138
Abbildung 53: Verteilung der maximalen Besetzungsgrade je Lastfahrt und Szenario. Dargestellt ist der Anteil der Ridesharing-Lastfahrten mit 1 bis 6 Fahrgästen als maximalem Besetzungsgrad (n = Lastfahrtanzahl) (RICHTER ET AL. (2021)).	140
Abbildung 54: Anzahl der Ridesharingfahrzeug-Ankünfte sowie leer wartender Ride-sharingfahrzeuge am Umsteigepunkt Bahnhof Esslingen in Szenario S01 je Zeitintervall (RICHTER ET AL. (2021)).	142
Abbildung 55: Differenzplots makroskopischer und gerundeter Nachfrage entsprechend Abbildung 20, S. 83. Rundung ohne Zufallszahl. Die Differenz der Gesamtnachfrage liegt bei weniger als einem Personenweg.	165
Abbildung 56: Differenzplots makroskopischer und gerundeter Nachfrage entsprechend Abbildung 22, S. 85. Rundung ohne Zufallszahl. Die Differenz der Gesamtnachfrage liegt bei weniger als einem Personenweg.	166
Abbildung 57: Verteilung der Merkmalskombinationen unter den Umfrageteilnehmenden. n = 187.	183

Kurzfassung

Ein grundlegendes Ziel der Verkehrsplanung ist es, möglichst gute Erreichbarkeiten für Verkehrsteilnehmende zu schaffen und gleichzeitig die negativen Auswirkungen des Verkehrs auf Menschen und Umwelt zu minimieren. Ein attraktives Angebot des öffentlichen Verkehrs (ÖV) kommt diesem Ziel zugute. Oftmals ist ein wirtschaftlicher Betrieb in schwach nachgefragten Orten und Zeiten jedoch nicht realisierbar. Mit der Hoffnung auf vollautomatisierte, fahrerlos fahrende Fahrzeuge und damit verbundene Kostensenkungen treten in diesem Zusammenhang zunehmend geteilte Fahrzeugflotten in den Blick des öffentlichen Interesses.

Auf geteilten Fahrzeugflotten beruhende Sharingangebote bieten Verkehrsteilnehmenden die Möglichkeit, Wege entweder lediglich mit einem geteilten Fahrzeug zurückzulegen (Carsharing) oder aber auch die Fahrzeugfahrt zeitgleich mit anderen zu teilen (Ridesharing). Sowohl Carsharing als auch Ridesharing machen bisher nur einen sehr geringen Anteil der in Deutschland zurückgelegten Wege aus (MiD 2017, NOBIS UND KUHNIMHOF (2018)). Für zukünftige Szenarien sollten jedoch frühzeitig und möglichst objektiv und fundiert geeignete Wirkungsmechanismen identifiziert werden, um räumlich und zeitlich weitverbreitete Sharingangebote in eine verkehrsplanerisch zielführende Richtung lenken zu können. Verkehrsnachfragemodelle sind dafür ein geeignetes Mittel.

In der Praxis verwendete Verkehrsnachfragemodelle bilden Sharingangebote bisher in der Regel nicht ab. Um diese zu integrieren, müssen sie erweitert werden. Grundlegend lassen sich zwei Arten der Nachfragebetrachtung in Verkehrsnachfragemodellen unterscheiden: mikroskopisch und makroskopisch. Nahezu alle Forschungsansätze zur Integration von Sharingangeboten in Verkehrsnachfragemodelle sind mikroskopisch, ein großer Teil der in der Praxis verwendeten Modelle jedoch makroskopisch (NARAYANAN ET AL. (2020), VOSOOGHI (2019)). In dieser Arbeit wird daher eine Methodik vorgestellt, um Sharingangebote in (bestehende) makroskopische Verkehrsnachfragemodelle zu integrieren. Im Fokus der Arbeit steht nicht die Bestimmung von Angebotsmerkmalen oder Verhaltensparametern der Verkehrsteilnehmenden. Vielmehr wird eine Methodik zur Untersuchung dieser Annahmen aufgezeigt.

Die Methodik ermöglicht eine Rückkopplung zwischen Angebot und Nachfrage und orientiert sich am klassischen Vier-Stufen-Algorithmus. Dieser wird unter anderem um Schritte zur Abbildung betriebsseitiger nachfrageabhängiger Prozesse ergänzt. Dabei werden Fahrtenbündelung und Umlaufbildung unterschieden. Die Fahrtenbündelung ist nur für Ridesharing relevant und fasst voneinander unabhängige Personenfahrten in Fahrzeugfahrten zusammen. Die Umlaufbildung verkettet Lastfahrten der Sharingfahrzeuge mittels Leerfahrten zu Fahrzeugumläufen und berechnet die benötigte Flottengröße. Die von FRIEDRICH ET AL. (2018) und RICHTER ET AL. (2019) bzw. HARTLEB ET AL. (2021) vorgestellten Algorithmen bilden die Grundlage dieser Schritte. In Bezug auf die Bündelung werden in der vorliegenden Arbeit vertiefende Untersuchungen durchgeführt, die den Einfluss der vom Betreiber garantierten maximalen Fahrgast-Wartezeit sowie den Einfluss der makroskopischen Nachfragebetrachtung auf den Bündelungsgrad

untersuchen. Im Bündelungsalgorithmus nach FRIEDRICH ET AL. (2018) und RICHTER ET AL. (2019) wird eine stetige und abschnittsweise abwechselnd konstante oder linear steigende Funktion zur Berechnung der Fahrzeuglastfahrtanzahl in Abhängigkeit der Personennachfrage genutzt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine alternative Funktionsform entwickelt, die sich bei zunehmender Personennachfrage einem linear steigenden Verlauf annähert. Darüber hinaus wird ein summenerhaltender Rundungsalgorithmus vorgestellt, der es ermöglicht zeitintervallspezifische Nachfragematrizen ganzzahlig zu runden. Die in dieser Arbeit präsentierte Modellierungsmethode ist sowohl für ganzzahlige als auch nicht-ganzzahlige Nachfrage geeignet.

Des Weiteren werden die klassischen Schritte des Vier-Stufen-Algorithmus zur Integration von Sharingangeboten angepasst. Je nachdem ob das Sharingangebot als Teil des ÖV oder in Konkurrenz dazu angeboten wird, stehen unterschiedliche Schritte im Vordergrund. Wird Sharing in Konkurrenz zum ÖV angeboten steht die Erweiterung der Moduswahl im Vordergrund. Eine beispielhafte Erhebung und Modellschätzung zeigen einen möglichen Weg auf. Wird Sharing als Teil des ÖV angeboten, sollte es möglichst nicht in direkter Konkurrenz zu bestehenden fahrplangebundenen Angeboten stehen, um diese nicht zu schwächen. Es wird ein Ansatz vorgestellt, der auf einer räumlichen Trennung der Angebotsformen beruht. Dabei wird fahrplangebundener ÖV, direktes Sharing, bei dem Sharing als einziges Verkehrsmittel auf einem Weg genutzt wird, und Sharing als Zubringer zu fahrplangebundenem ÖV unterschieden. Sharing als Zubringer wird in die fahrplanbasierte ÖV-Umlegung eingebunden, um Abfahrten von Bussen und Bahnen als Referenzpunkte für Abfahrts- und Ankunftszeiten der Sharingfahrzeuge verwenden zu können.

Die vorgestellte Modellierungsmethode wird in einer Fallstudie zu in den ÖV integriertem Ridesharing im makroskopischen Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart angewendet. Es werden Szenarien untersucht, in denen im peri-urbanen Planungsraum vorhandene Buslinien durch Ridesharingangebote ersetzt werden. Je nach gewünschter Verbindung wird Ridesharing als Zubringer zu schienengebundenen Verkehrsmitteln oder direkt angeboten. Insbesondere direktes Ridesharing kann den ÖV attraktiver machen. Das führt jedoch auch zu erhöhten betrieblichen Aufwänden und erhöhten durchschnittlichen Reiseweiten im Planungsraum. Die Attraktivitätssteigerung durch Ridesharing als Zubringer ist aufgrund des systemimmanenten Umstiegs und benötigter Pufferzeiten zur Abfederung von Fahrtzeitschwankungen begrenzt. Insgesamt liegt der durchschnittliche Besetzungsgrad der Fahrten in allen Szenarien niedrig. Das ist unter anderem auf die im peri-urbanen Raum typischerweise räumlich und zeitlich disperse Nachfragestruktur zurückzuführen. Ridesharingangebote sind somit insgesamt dazu geeignet das ÖV-Angebot attraktiver zu machen, jedoch ist ihre Effizienz in peri-urbanen und ländlichen Räumen beschränkt. In Städten wiederum, die eine hohe räumlich und zeitlich gebündelte Nachfrage aufweisen, ist es unter verkehrsplanerischen Aspekten wünschenswert den bestehenden ÖV nicht zu schwächen. Die vorgestellte Modellierungsmethodik bereitet einen Weg, um bereits im Vorfeld der Etablierung potenziell bedeutender Sharingangebotsformen Wirkungszusammenhänge zu identifizieren, und ermöglicht somit eine zielgerichtete Verkehrsplanung.

Abstract

A general objective of transport planning is to provide the best possible accessibilities for transport users and, at the same time, to minimize the negative effects of transport on people and the environment. An attractive public transport supply benefits this objective. Often, however, cost-effective operation is not feasible in low-demand areas and times. With the hope on fully automated, driverless vehicles and the associated cost reductions, shared vehicle fleets are increasingly coming into the focus of public interest.

Services based on shared vehicle fleets offer travelers the option of either using a shared vehicle only for themselves (carsharing) or even sharing a vehicle trip with others at the same time (ridesharing). So far, both carsharing and ridesharing account for only a very small share of the trips made in Germany (MiD 2017, NOBIS UND KUHNIMHOF (2018)). For future scenarios, however, suitable impact mechanisms should be identified at an early stage and as objectively and well founded as possible. This will allow spatially and temporally widespread sharing services to be steered in a direction that is conducive to objectives of transport planning. Travel demand models are a suitable tool for this purpose.

Travel demand models used in practice do not usually include sharing services. In order to integrate these, they need to be extended. Basically, two types of demand interpretation can be distinguished in travel demand models: microscopic and macroscopic. While almost all research approaches to integrating sharing services into travel demand models are microscopic, a large proportion of models used in practice are macroscopic (NARAYANAN ET AL. (2020), VOSOOGHI (2019)). This thesis therefore presents a methodology to integrate sharing services into (existing) macroscopic travel demand models. The focus of the thesis is not on determining supply characteristics or behavioral parameters of travelers. Rather, a methodology for investigating these assumptions is presented.

The methodology allows a feedback between supply and demand and is based on the traditional four-step algorithm. On the one hand, the algorithm is extended by steps for modeling operational demand-dependent processes. These steps distinguish trip pooling and vehicle scheduling. Trip pooling is only relevant for ridesharing and pools independent passenger trips into vehicle trips. Vehicle scheduling concatenates service trips of the sharing vehicles by adding empty trips. The resulting vehicle schedules determine the required fleet size. The algorithms presented by FRIEDRICH ET AL. (2018) and RICHTER ET AL. (2019) and HARTLEB ET AL. (2021), respectively, provide the basis for these steps. Regarding trip pooling, in-depth studies are carried out in this thesis. These studies investigate the influence of the maximum passenger waiting time guaranteed by the operator, as well as the influence of the macroscopic demand interpretation on the pooling rate. In the pooling algorithm of FRIEDRICH ET AL. (2018) and RICHTER ET AL. (2019), a piecewise defined linear function with linearly increasing and constant segments is used to calculate the number of vehicle service trips as a function of passenger demand. In this thesis, an alternative type of function is developed that approximates a linear increase as passenger demand grows. Furthermore, a sum-preserving rounding algorithm is presented, which allows time interval specific demand matrices to be rounded to an

integer. In doing so, the spatial and temporal demand structure is reproduced well. The background of the optional integer rounding of demand is the simplification of the calculation method of pooling and vehicle scheduling. However, some information on demand is lost with this procedure. The proposed modeling method is suitable for both integer and non-integer demand.

On the other hand, the traditional steps of the four-step algorithm are adapted to integrate sharing services. Depending on whether the sharing service is to be offered as part of public transport or in competition with it, different steps are of primary concern. If sharing is offered in competition with public transport, the focus is on expanding the mode choice model. An exemplary survey and model estimation show a possible way to proceed. If sharing is offered as part of public transport, it should not be in direct competition with existing timetable-based services in order not to undermine them. An approach is presented that is based on a spatial separation of the service options. A distinction is made between timetable-based public transport, direct sharing, in which sharing serves as the only means of transport on a trip, and sharing as a feeder to timetable-based public transport. Sharing as a feeder is integrated into the timetable-based public transport assignment. This enables the use of bus and train departures as reference points for departure and arrival times of sharing vehicles.

The presented modeling method is applied in a case study of ridesharing as part of public transport in the macroscopic travel demand model of the Stuttgart region. Scenarios are investigated in which existing bus lines in the peri-urban planning area are replaced by ridesharing services. Depending on the desired connection, ridesharing is offered as a feeder to rail-based transport or as a direct service. Direct ridesharing in particular has the potential to make public transport more attractive. However, this also leads to increased operational expenses and increased average traveled distances within the planning area. Ridesharing as a feeder, however, is limited in its attractiveness due to the system-immanent transfer and the buffer times needed to compensate for travel time fluctuations. Overall, the average occupancy rate of the sharing trips is low in all scenarios. Among other things, this can be put down to the spatially and temporally dispersed demand structure that is typical for peri-urban areas. Ridesharing services are therefore generally suited to make public transport more attractive, but their efficiency in peri-urban and rural areas is limited. In cities, on the other hand, which have a high spatially and temporally concentrated demand, it is desirable from a transport planning point of view not to weaken the existing public transport system. The presented modeling methodology provides a way to identify interdependencies already prior to the establishment of potentially impactful sharing services and thus allows for strategic transport planning.

1 Einleitung

Ein grundlegendes Ziel der Verkehrsplanung ist es, die negativen Wirkungen des Verkehrs auf Menschen und Umwelt zu reduzieren. Damit geht beispielsweise einher, dass Fahrzeugkilometer insbesondere gering besetzter und konventionell angetriebener Pkw möglichst reduziert werden. Zugleich soll die Erreichbarkeit verschiedener Ziele für die Bevölkerung erhalten oder noch verbessert werden. Insbesondere in ländlich geprägten Gebieten spielt der private Pkw jedoch eine wichtige Rolle bei der Erreichbarkeitssicherung. Dort ist es nur schwer möglich auf Pkw-Fahrten zu verzichten, wenn kein oder nur ein dünnes Angebot des öffentlichen Verkehrs (ÖV) vorhanden ist.

Als ein möglicher Weg aus diesem Dilemma werden mit Blick auf die voranschreitende Automatisierung immer wieder Angebote genannt, die auf geteilten Flotten vollautomatisierter, also vollständig fahrerlos fahrender Fahrzeuge beruhen. Diese geteilten Fahrzeugflotten werden genutzt, um Sharingangebote zu schaffen. Hierbei werden Fahrzeugfahrten zeitgleich (Ridesharing) oder auch nur die Fahrzeuge der Flotte nacheinander (Carsharing) durch voneinander unabhängige Personen genutzt.

1.1 Hintergrund und Problemstellung

Es besteht die Hoffnung, durch eine gemeinsame Fahrzeugnutzung ein so attraktives Angebot zu schaffen, dass private Pkw ersetzt und Fahrzeugkilometer auf den Straßen eingespart werden. Zudem wird in Bezug auf Ridesharing häufig die Hoffnung genannt, eine möglichst kostendeckende Ergänzung für den öffentlichen Verkehr in nachfrage-schwachen Gebieten und Zeiten zu schaffen. Es stellen sich viele Fragen, die sowohl die Ausgestaltung des Angebots als auch die Nachfrage der Verkehrsteilnehmenden betreffen. Diese Fragen umfassen beispielsweise die folgenden:

- Welche Sharingangebotsform erfüllt die angestrebten Ziele? Sollte das Angebot Teil des ÖV sein?
- Sollte das System als Zubringer zum klassischen ÖV dienen? Welche Rahmenbedingungen müssen beachtet werden?
- Wie viele Fahrzeuge werden benötigt?
- Wie viele Personen können befördert werden?
- Wie hoch ist die Nachfrage?
- Wie viele Fahrzeugkilometer mit dem privaten Pkw werden dadurch eingespart? Wie viele zusätzliche Fahrzeugkilometer entstehen durch die geteilten Fahrzeuge?

Um in der Verkehrsplanungspraxis möglichst zielgerichtet agieren zu können, sollten Fragestellungen dieser Art bereits im Vorfeld einer praktischen Umsetzung untersucht werden. Diesem Zweck dienen Verkehrsnachfragemodelle, die die Wechselwirkungen von Verkehrsangebot und -nachfrage abbilden. Mittels Szenarienrechnungen können mit ihrer Hilfe die Effekte verschiedener Angebotskonfigurationen evaluiert werden.

Der Anteil der Wege, die heutzutage mit Car- oder Ridesharing zurückgelegt werden, ist jedoch gering. Entsprechend dem Ergebnisbericht der MiD 2017 von NOBIS UND KUHNIMHOF (2018) legen häufige Carsharing-Nutzende ohne eigenen Pkw etwa vier Prozent ihrer Wege mittels Carsharing zurück. Sowohl auf die gesamte Verkehrsleistung als auch auf das gesamte Verkehrsaufkommen in Deutschland bezogen ist der Carsharinganteil marginal (NOBIS UND KUHNIMHOF (2018)). Da der Anteil mit Sharingangeboten zurückgelegter Wege so gering ist, werden sie in den meisten Verkehrsnachfragemodellen bisher nicht berücksichtigt. Mit voranschreitender Digitalisierung und der Hoffnung auf mit Vollautomatisierung verbundenen Kostensenkungen im Betrieb (siehe z.B. BECKER ET AL. (2020)) könnte sich die Attraktivität und damit die Relevanz von Sharingangeboten in Verkehrsnachfragemodellen jedoch stark erhöhen.

Ansätze, die Sharingangebote in Verkehrsnachfragemodelle integrieren, sind bisher hauptsächlich mikroskopischer Natur (vergleiche dazu Kapitel 2.3 Sharingangebote in Verkehrsnachfragemodellen). Hierbei wird die Nachfrage von Individuen an einem zufällig gewählten spezifischen Tag in agentenbasierten Ansätzen abgebildet, wobei auch die genutzten Fahrzeuge als explizite Objekte modelliert werden. Ansätze für makroskopische Verkehrsnachfragemodelle, die die Nachfragesituation eines durchschnittlichen Tages in Wahrscheinlichkeiten ausdrücken, sind kaum vertreten. Das steht im Gegensatz dazu, dass sie in der Verkehrsplanungspraxis weit verbreitet sind (MOECKEL ET AL. (2019), VOSOOGHI (2019), PESTEL (2021)). Während es mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle ermöglichen, das Verhalten der Verkehrsteilnehmenden und deren Entscheidungsprozesse möglichst gut zu verstehen und nachzubilden, liegt der Fokus makroskopischer Modelle darin, aggregiertes Verkehrsverhalten, beispielsweise ausgedrückt durch Verkehrsstärken oder Fahrleistung, zu berechnen (ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011), McNALLY UND RINDT (2008)). Die weiterhin hohe Verbreitung makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle liegt unter anderem darin begründet, dass es große Datenmengen und viel Aufwand erfordert, ein neues Verkehrsnachfragemodell aufzubauen. Zudem setzt die Anwendung eines Modells und die Interpretation der Ergebnisse ein möglichst gutes Verständnis des Modells und seiner Rechenweise durch die Anwenderin bzw. den Anwender voraus. Nur so können Fehlinterpretationen vermieden und Scheingenaugkeiten erkannt werden.

Der verbreitete Einsatz makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle einerseits und die absehbar zunehmende Bedeutung einer geteilten Fahrzeugnutzung als Bestandteil des Verkehrsangebots andererseits stellen den Hintergrund dieser Arbeit dar. Es besteht die Notwendigkeit auch (bestehende) makroskopische Modelle im Kontext von Sharingangeboten nutzen zu können. Dies hat einen hohen Mehrwert, da so eine große Anzahl verschiedener Untersuchungsgebiete betrachtet werden kann. Insbesondere für nachfrageabhängige Sharingangebote ist das relevant.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik ermöglicht die Erweiterung bestehender makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle um Sharingangebote. Dabei wird der Prozess der Verkehrsnachfrageberechnung insgesamt betrachtet sowie der makroskopischen Nachfrageinterpretation Rechnung getragen. Es wird ein modelltheoretischer Ansatz vorgestellt und angewendet. Nicht im Fokus dieser Arbeit steht die Festlegung spezifischer Angebotsmerkmale oder Verhaltensparameter der Verkehrsteilnehmenden, wie beispielsweise Preise oder die Bereitschaft zum Teilen einer Fahrzeugfahrt oder eines Fahrzeugs. Vielmehr wird eine Methodik zur Untersuchung dieser Annahmen aufgezeigt. Dazu gliedert sich die Arbeit wie folgt.

Auf das einführende Kapitel 1 folgend, werden in Kapitel 2 zum einen Grundlagen der Verkehrsnachfragemodellierung erläutert (Kapitel 2.1). Unter anderem erfolgt eine Differenzierung zwischen mikroskopischen und makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen, die aufzeigt, warum mikroskopische Ansätze nicht ohne Weiteres in makroskopische Modelle übertragen werden können. Zum anderen werden Systemeigenschaften verschiedener Sharingangebotsformen und deren Bedeutung in der Modellierung dargelegt (Kapitel 2.2). Den Abschluss dieses Grundlagenteils bildet ein Überblick über den Stand der Forschung im Themenfeld der Modellierung von Sharingangeboten (Kapitel 2.3) sowie die Abgrenzung und Nachschärfung der bisher grob beschriebenen Zielstellung (Kapitel 2.4).

Die Kapitel 3 bis 6 befassen sich mit der Methodik zur Erweiterung makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle um Sharingangebote. Kapitel 3 beschreibt die grundlegende Erweiterung der Modellstruktur auf Ebene der einzelnen Modellstufen der klassischen makroskopischen Verkehrsnachfragemodellierung (Kapitel 3.1). In Kapitel 3.2 wird das Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart vorgestellt, das als Anwendungsbeispiel dient. Die Kapitel 4 bis 6 orientieren sich an den anzupassenden bzw. neu hinzuzufügenden Modellstufen der in Kapitel 3.1 dargelegten Modellstruktur und enthalten jeweils

- die Anforderungen an die Erweiterung der Modellierungsmethode dieser Modellstufe zur Integration geteilter Fahrzeugflotten,
- die vorgeschlagene Modellierungsmethode,
- eine Beispielanwendung im Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart sowie
- ein Zwischenfazit und die Bewertung der vorgeschlagenen Methode.

Kapitel 4 widmet sich den neu hinzuzufügenden Modellstufen zur Abbildung der nachfrageabhängigen Angebotsstruktur von Sharingangeboten. Das heißt, in diesen Stufen werden, anders als in den Stufen der klassischen Verkehrsnachfragemodellierung, nicht die Entscheidungen der Verkehrsteilnehmenden, sondern betriebliche Entscheidungsprozesse abgebildet. Hierbei wird ein besonderes Augenmerk auf die ridesharingspezifische Fahrtenbündelung, also das Zusammenlegen voneinander unabhängiger Fahrtwünsche in eine Fahrzeugfahrt, gerichtet (Kapitel 4.2). Zudem wird ein Ansatz zur

Umlaufbildung der Fahrzeugflotte (Kapitel 4.3) sowie dem Runden von Nachfrage (Kapitel 4.4) vorgestellt.

Kapitel 5 befasst sich mit der Erweiterung der Moduswahl und enthält die Beschreibung und Auswertung einer beispielhaften Erhebung und Modellschätzung (Kapitel 5.2), die eine mögliche Herangehensweise illustriert.

Den letzten methodischen Teil bildet Kapitel 6 zur Erweiterung der Verkehrsmittel- und Verbindungswahl im öffentlichen Verkehr.

Die in Kapitel 7 betrachtete Fallstudie im entsprechend erweiterten Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart dient einem doppelten Zweck. Zum einen wird die Praktikabilität der präsentierten Methoden unter Beweis gestellt. Zum anderen werden konkrete Ergebnisse eines Anwendungsfalls der vorgestellten Methodik gezeigt: Die Wirkungen eines in den öffentlichen Verkehr integrierten Ridesharingangebots in einem peri-urbanen Raum mit Anschluss an ein Schienenverkehrssystem. Im Rahmen der berechneten Szenarien werden Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage und Fahrleistung (Kapitel 7.3), Auswirkungen auf den Betrieb (Kapitel 7.4) sowie ridesharingspezifische Kenngrößen (Kapitel 7.5) untersucht.

Den Abschluss der Arbeit bildet Kapitel 8 mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit und einem Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf.

2 Einordnung und Grundlagen

Im Folgenden werden grundlegende Informationen und Zusammenhänge bezüglich Verkehrsnachfragemodellierung (Kapitel 2.1) und Systemeigenschaften geteilter Fahrzeugflotten (Kapitel 2.2) gegeben. Hierbei besteht jeweils kein Anspruch auf vollständige Erläuterung der umfassenden Themengebiete, vielmehr wird ein auf die Arbeit zugeschnittener Inhalt und Überblick gegeben, der für das Verständnis und die Abgrenzung der Arbeit (Kapitel 2.4) notwendig ist. Kapitel 2.3 befasst sich mit dem Inhalt dieser Arbeit ähnlichen Forschungsarbeiten aus der Literatur.

2.1 Verkehrsnachfragemodelle

Dieses Kapitel bildet eine Grundlage zum Thema Verkehrsnachfragemodellierung. Diskrete Wahlmodelle (Kapitel 2.1.1) und die zur Erstellung notwendige Parameterschätzung auf Basis von Erhebungen (Kapitel 2.1.2) bilden die Basis zur Abbildung von Wahlentscheidungen der Verkehrsteilnehmenden. Die in Kapitel 2.1.3 erläuterte Modellstruktur eines typischen Verkehrsnachfragemodells dient als Referenz für die im Rahmen dieser Arbeit erläuterten Modellanpassungen. Zur Abgrenzung und Einordnung der vorgestellten Methoden im Kontext verwandter Arbeiten dient die Differenzierung mikroskopischer und makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle (Kapitel 2.1.4).

2.1.1 Diskrete Wahlmodelle

Im Folgenden wird ein grundlegender und auf den Inhalt dieser Arbeit zugeschnittener Überblick über den Themenbereich diskreter Wahlmodelle gegeben. Für einen tieferen und umfassenderen Einblick sei auf die Werke von ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011), BEN-AKIVA UND LERMAN (2006) sowie TRAIN (2009) verwiesen.

Verkehrsnachfragemodelle bilden die Entscheidungen von Personen bezüglich ihres Verkehrsverhaltens ab. Um diese Entscheidungen nachbilden zu können, müssen die Zusammenhänge zwischen personenbezogenen Eigenschaften und Eigenschaften der vorhandenen Wahlmöglichkeiten abgebildet werden. Grundlage für diese Aufgabe bilden diskrete Wahlmodelle. Diskrete Wahlmodelle wiederum beruhen überwiegend auf der Random Utility Theory (stochastische Nutzentheorie) und weisen unter anderem die im Folgenden erläuterten Eigenschaften auf.

Den im Modell abgebildeten Personen steht je eine endliche Menge voneinander abgrenzbarer Alternativen zur Verfügung. Entsprechend dem Grundsatz der Nutzenmaximierung wählt jede Person immer die Alternative mit dem für sie höchsten individuellen Nutzen. Um den personenbezogenen Nutzen zu bestimmen, werden einzelnen Personen oder als homogen betrachteten Personengruppen Merkmale und Eigenschaften, wie z.B. Einkommen oder Pkw-Verfügbarkeit, in Form von Attributen zugewiesen.

Ebenso werden die messbaren Eigenschaften der zur Wahl stehenden Alternativen in Attributen festgehalten. Da es nicht möglich ist, in einem Modell alle personen- sowie alternativenbezogenen Eigenschaften abzubilden, ergibt sich der individuell wahrgenommene Nutzen einer Alternative als Summe eines deterministischen und eines stochastischen Nutzenanteils (siehe Formel (1)). Der deterministische Anteil besteht aus den für die Modellerstellenden messbaren und repräsentativen Teilen der Nutzenfunktion. Der stochastische Anteil beinhaltet im deterministischen Teil nicht erfasste und daher als zufällig behandelte Einflüsse, wie z.B. individuelle Eigenheiten von Personen oder Messfehler. Da der stochastische Nutzenanteil als Differenz von Gesamtnutzen und durch das Modell erfassten Nutzen definiert ist, werden damit alle vom berechneten Nutzenmaximum abweichenden Entscheidungen erklärt. (ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011), BEN-AKIVA UND LERMAN (2006))

$$u_{gi} = v_{gi} + \varepsilon_{gi} \tag{1}$$

mit

u_{gi} personenbezogener Gesamtnutzen u der Alternative i für die Gruppe g

v_{gi} deterministischer Nutzenanteil v der Alternative i für die Gruppe g

ε_{gi} stochastischer Nutzenanteil ε der Alternative i für die Gruppe g

Um Nutzenbeträge in Auswahlwahrscheinlichkeiten für einzelne Alternativen zu überführen, werden diskrete Wahlmodelle gebildet. Aus den Annahmen bezüglich der Verteilung des stochastischen Nutzenanteils ergeben sich unterschiedliche Wahlmodelle. BEN-AKIVA UND LERMAN (2006) sowie TRAIN (2009) geben einen tieferen Einblick in diese Annahmen sowie die daraus entstehenden Wahlmodelle samt ihrer Restriktionen.

Das aufgrund seiner einfachen Form (siehe Formel (2)) in der Praxis am weitesten verbreitete Wahlmodell ist das Multinomiale Logit Modell (MNL). Die Annahme, dass die stochastischen Nutzenanteile aller Alternativen voneinander unabhängig und identisch verteilt sind, stellt die Hauptrestriktion des MNL dar. In gewisser Weise impliziert ein MNL dadurch einen Idealzustand, bei dem alle Attribute, die mehreren Alternativen gemein sind, bereits im deterministischen Nutzenanteil enthalten sind. Ist dies nicht der Fall, sind die stochastischen Nutzenanteile der betroffenen Alternativen nicht voneinander unabhängig. TRAIN (2009) nennt als Hauptanreiz zur Entwicklung weiterer Modelle neben dem MNL den Wunsch, Korrelationen der stochastischen Nutzenanteile abbilden zu können. (TRAIN (2009), BEN-AKIVA UND LERMAN (2006))

Eine weitere zentrale Eigenschaft des MNL ist die IIA (independence of irrelevant alternatives). Die IIA äußert sich darin, dass es bei Hinzufügen einer neuen Alternative oder Verbesserung/Verschlechterung einer bestehenden Alternative zur proportionalen Verschiebung der Nachfrage kommt. Das bedeutet beispielsweise, dass, wenn eine neue Alternative einen bestimmten Prozentsatz der Gesamtnachfrage dazugewinnt, die Nachfrage aller anderen Alternativen um den gleichen Prozentsatz sinkt. Ob die IIA eine

wünschenswerte Eigenschaft ist oder nicht, ist fallspezifisch. (TRAIN (2009), ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011))

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht ausgewählter diskreter Wahlmodelle der Logit-Familie, die in der Verkehrsnachfragemodellierung Anwendung finden.

Modellbezeichnung	Formel	Eigenschaften	Schema zur Alternativenwahl
Multinominales Logit Modell (MNL) (TRAIN (2009), ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011))	(2)	<ul style="list-style-type: none"> Einfache Form Gleich verteilte und unabhängige stochastische Nutzenanteile über alle Alternativen i IIA zwischen allen Alternativen i 	
Nested Logit Modell (NL) mit zwei Ebenen (TRAIN (2009), ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011), BEN-AKIVA UND BIERLAIRE (1999))	(3), (4)	<ul style="list-style-type: none"> Stochastische Nutzenanteile der Alternativen i eines Nests j korrelieren, die von Alternativen verschiedener Nester sind weiterhin unabhängig voneinander IIA gilt nur innerhalb von Nestern, nicht nestübergreifend 	
Cross Nested Logit Modell (CNL) (BEN-AKIVA UND BIERLAIRE (1999))	(5), (6)	<ul style="list-style-type: none"> Direkte Erweiterung des NL Zugehörigkeit der Alternativen i zu mehreren Nestern j ist möglich 	

Tabelle 1: Übersicht ausgewählter diskreter Wahlmodelle der Logit-Familie.

Die Auswahlwahrscheinlichkeiten der vorgestellten Wahlmodelle ergeben sich entsprechend folgender Formeln:

Multinominales Logit Modell (MNL):

$$P_{gi} = \frac{\exp(\mu \cdot v_{gi})}{\sum_{i' \in I_g} \exp(\mu \cdot v_{gi'})} \quad (2)$$

Nested Logit Modell (NL):

ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011) geben einen Überblick über Formulierungen des NL. Die folgende, BEN-AKIVA UND BIERLAIRE (1999) entsprechende Spezifikation mit zwei Ebenen und nestspezifischen Skalierungsparametern entspricht der Formel nach WILLIAMS (1977) und DALY UND ZACHARY (1978) mit zusätzlichem nestspezifischen Nutzenanteil. Auf die Notation der Personengruppenzugehörigkeit wird zugunsten der Lesbarkeit verzichtet.

$$P_i = P_{i/j} \cdot P_j \quad (3)$$

$$P_i = \frac{\exp(\lambda_j \cdot v_i)}{\sum_{i' \in j} \exp(\lambda_j \cdot v_{i'})} \cdot \frac{\exp \left[\mu \cdot \left\{ v_j + \frac{1}{\lambda_j} \cdot \ln \left(\sum_{i' \in j} \exp(\lambda_j \cdot v_{i'}) \right) \right\} \right]}{\sum_{j' \in J} \exp \left[\mu \cdot \left\{ v_{j'} + \frac{1}{\lambda_{j'}} \cdot \ln \left(\sum_{i' \in j'} \exp(\lambda_{j'} \cdot v_{i'}) \right) \right\} \right]} \quad (4)$$

Cross Nested Logit Modell (CNL):

Formulierung nach BEN-AKIVA UND BIERLAIRE (1999) unter der vereinfachenden Annahme von einheitlichen nestspezifischen Skalierungsparametern. Auf die Notation der Personengruppenzugehörigkeit wird zugunsten der Lesbarkeit verzichtet.

$$P_i = \sum_{j \in J} P_{i/j} \cdot P_j \quad (5)$$

$$P_i = \sum_{j \in J} \left[\frac{\alpha_{ij} \cdot \exp(v_i)}{\sum_{i' \in j} \alpha_{i'j} \cdot \exp(v_{i'})} \cdot \frac{\exp \left[\mu \cdot \left\{ v_j + \ln \left(\sum_{i' \in j} \alpha_{i'j} \cdot \exp(v_{i'}) \right) \right\} \right]}{\sum_{j' \in J} \exp \left[\mu \cdot \left\{ v_{j'} + \ln \left(\sum_{i' \in j'} \alpha_{i'j'} \cdot \exp(v_{i'}) \right) \right\} \right]} \right] \quad (6)$$

mit

P_{gi}, P_i	Wahrscheinlichkeit p , dass eine Person der Gruppe g Alternative i wählt
$P_{i/j}$	Wahrscheinlichkeit p , dass in Nest j Alternative i gewählt wird
P_j	Wahrscheinlichkeit p , dass Nest j gewählt wird
v_{gi}, v_i, v_j	deterministischer Nutzenanteil v der Alternative i bzw. nestspezifischer Nutzenanteil des Nests j für die Gruppe g
I_g	Menge I der für Gruppe g verfügbaren Alternativen i
J	Menge der modellierten Nester j
μ	alternativenübergreifender Skalierungsparameter, meist auf $\mu = 1$ normiert (ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011))
λ_j	nestspezifischer Skalierungsparameter des Nests j , wobei $\mu \leq \lambda_j \quad \forall j$
α_{ij}	Parameter, der den Grad der Zugehörigkeit von Alternative i zu Nest j angibt, wobei $0 \leq \alpha_{ij} \leq 1$ und $\sum_{j \in J} \alpha_{ij} = 1$

Neben den dargestellten Modellen der Logit-Familie gibt es weitere Modelle, wie beispielsweise Probit oder Mixed Logit Modelle, die zumeist die Restriktionen des MNL überwinden. Diese Modelle besitzen häufig keine mathematisch geschlossene Form und Ergebnisse müssen daher geschätzt oder mittels Simulationen berechnet werden. (TRAIN (2009), ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011), BEN-AKIVA UND BIERLAIRE (2003))

2.1.2 Parameterschätzung von Nutzenfunktionen

In den vorgestellten Wahlmodellen werden Auswahlwahrscheinlichkeiten anhand von personenbezogenen Nutzenwerten verschiedener Alternativen berechnet. Genauer betrachtet, werden die Auswahlwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der Nutzendifferenzen der Alternativen gebildet. Der absolute Nutzenwert ist sowohl für die Entscheidung der wählenden Person als auch für das Ergebnis des Wahlmodells irrelevant (Erläuterung siehe beispielsweise TRAIN (2009)). Die Nutzendifferenzen wiederum ergeben sich mittels alternativenspezifischer Nutzenfunktionen, die aus einem deterministischen und einem als stochastisch angenommenen Nutzenanteil (vgl. Formel (1), S. 24) bestehen.

Im Folgenden geht es um den deterministischen Part des Nutzens und dessen Umsetzung in den in Wahlmodellen verwendeten Nutzenwert. Der deterministische Nutzenanteil wird zumeist als eine lineare Funktion der durch die Modellerstellenden erfassten Attribute der zur Wahl stehenden Alternativen sowie einer alternativenspezifischen Konstante abgebildet:

$$v_{gi} = \beta_{0gi} + \sum_{k \in K} \beta_{kgi} \cdot x_{kgi} \quad (7)$$

mit

v_{gi}	deterministischer Nutzenanteil v der Alternative i für die Gruppe g
β_{0gi}	alternativenspezifische Konstante β_0 des Nutzens der Alternative i für die Gruppe g
β_{kgi}	Parameter zur Gewichtung des Nutzens des Attributwerts x_{kgi}
x_{kgi}	Wert x des Attributs k der Alternative i für die Gruppe g
K	Menge der Attribute k

Die alternativenspezifische Konstante einer Alternative bildet den mittleren Einfluss aller nicht im Modell berücksichtigten Faktoren auf den Nutzen dieser Alternative ab. Somit liegt der Mittelwert des stochastischen, unbeobachteten Nutzenanteils bei Einbeziehen der alternativenspezifischen Konstanten bei null. Da lediglich die Nutzendifferenz von Relevanz ist, wird stets eine der alternativenspezifischen Konstanten auf null normiert. Somit geben alle anderen, nicht normierten Konstanten den mittleren Effekt der unbeobachteten Faktoren relativ zur normierten Alternative wieder. (TRAIN (2009))

Da nicht alle Attribute, beispielsweise Kosten und Zeitaufwand, und die Änderung ihrer Werte um eine Einheit den gleichen Effekt auf den wahrgenommenen Nutzen einer Alternative haben, werden attributspezifische Gewichtungparameter genutzt. Diese Parameter können je Attribut entweder generisch, also für alle Alternativen gleich, oder alternativenspezifisch angelegt werden.

Um ein Wahlmodell zu erstellen, werden Daten zum Wahlverhalten der abgebildeten Personen benötigt. Diese Daten werden mittels Umfragen erhoben. Je nach Umfragetyp werden die Probanden zu bereits getätigten Entscheidungen befragt (Revealed Preference) oder aber zu hypothetischen Entscheidungssituationen (Stated Preference). Ein großer Vorteil von Revealed Preference Befragungen ist naturgemäß ihre Realitätsnähe. Bei vielen Themen ist eine Revealed Preference Befragung jedoch nicht möglich, da Zustände untersucht werden sollen, die so (noch) nicht in der Realität vorhanden sind. Ein Beispiel für eine solche Fragestellung, für die statt Revealed Preference nur Stated Preference Befragungen in Frage kommen, ist, welche Auswirkungen ein flächendeckend und langfristig etabliertes Ridesharingangebot auf die Verkehrsnachfrage hat. Ein Vorteil der Stated Preference Befragungen ist, dass die zur Wahl stehenden Alternativen samt ihrer jeweiligen Attributwerte nach Wunsch der Modellerstellenden festgelegt werden können. Von Nachteil ist, dass Befragte in hypothetischen Entscheidungssituationen oftmals anders wählen als in der Realität. (TRAIN (2009), ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011))

Bei beiden Befragungsarten werden neben den zur Wahl stehenden Alternativen sowohl personenbezogene als auch alternativenbezogene Attributwerte jeder Entscheidungs-

situation gespeichert. Auf Grundlage des so generierten Datensatzes von Wahlentscheidungen samt Attributwerten können Parameterwerte für zuvor definierte Modellspezifikationen geschätzt werden. Zur Lösung dieser Aufgabe wird überwiegend die Maximum Likelihood Schätzung eines Parametersatzes genutzt. Die ermittelten Parameterwerte stellen die Werte dar, mit denen es unter der gegebenen Modellstruktur am wahrscheinlichsten ist, das Ergebnis der im Datensatz hinterlegten Befragungsergebnisse zu reproduzieren. Anschließend werden mit dem so geschätzten Modell Tests durchgeführt, die dazu dienen, die Modellspezifikation anzupassen und so zu verbessern. Ein typischer statistischer Test ist zum einen der Test auf Signifikanz der verwendeten Parameter (und der zugehörigen Attribute). Hierbei wird mittels t-Test die Hypothese geprüft, ob der betrachtete Parameter in Wahrheit null ist, das zugehörige Attribut also keinen signifikanten Einfluss auf den Nutzen der Alternativen hat. Darüber hinaus wird weiterhin typischerweise mittels Likelihood Ratio Test untersucht, ob Attribute und deren Parameter generisch oder alternativenspezifisch sind. Hierbei wird mittels t-Tests untersucht, ob die betrachteten Parameter signifikant verschieden (alternativenspezifisch) sind oder nicht (generisch). Ein weniger formalisierter, aber nicht minder wichtiger Test ist das Prüfen der Vorzeichen der geschätzten Parameter auf Übereinstimmung mit vorangehenden Erwartungen und theoretischen Überlegungen. (ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011))

Zur vertiefenden Lektüre der beschriebenen Grundlagen sei auf die Werke von ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011), TRAIN (2009) und BEN-AKIVA UND LERMAN (2006) verwiesen.

2.1.3 Modellstufen und Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage

Um die Wahlentscheidungen von Verkehrsteilnehmenden abzubilden, werden, wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, Informationen zu Eigenschaften sowohl der Personen, die die Wahl treffen, als auch der Alternativen, aus denen sie wählen können, benötigt. Diese Informationen liegen Verkehrsnachfragemodellen in Datenmodellen zugrunde, in denen die Eingangsdaten abgespeichert werden. Entsprechend den Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen für den Personenverkehr EVNM-PV (FGSV (2022)) können diese Datenmodelle wie folgt differenziert werden:

- Das Datenmodell Mobilitätsverhalten enthält Informationen zum Mobilitätsverhalten der Bevölkerung, z.B. verhaltenshomogene Personengruppen, Aktivitätenketten, Aktivitätenhäufigkeiten und Reiseweiten.
- Das Datenmodell Verkehrsangebot stellt die Grundlage für ein Netz- oder auch Angebotsmodell dar. In diesem Modell werden u. a. mittels Knoten, Haltestellen, Strecken des Straßen- und Schienennetzes und ÖV-Linien samt Fahrplänen die Eigenschaften des Verkehrsangebots abgebildet. Auch Nutzungskosten und Fahrzeuge samt ihrer Eigenschaften sind Teil des Verkehrsangebots. Mittels Kenngrößenberechnungen können auf dem Angebotsmodell aufbauend im Zusammenspiel mit der Verkehrsnachfrageberechnung relations- und verbindungsbezogene Attributwerte

ermittelt werden. Das umfasst z.B. Kosten, Reisezeiten und Reiseweiten der den Verkehrsteilnehmenden zur Verfügung stehenden Alternativen.

- Das Datenmodell Siedlungsstruktur enthält Daten, die sowohl die Bevölkerungsstruktur als auch Nutzungen im Raum mit Bezug auf ihre Lage im Untersuchungsraum definieren. Das umfasst z.B. Wohnstandorte inkl. Einwohnerzahlen, Arbeitsplatzstandorte inkl. Arbeitsplatzzahlen sowie Einkaufsstandorte samt ihrer Ausprägungen.

Um das Verkehrsverhalten von Personen abzubilden, muss nicht nur eine einzelne Entscheidungssituation, sondern das komplexe Zusammenspiel einer Vielzahl von Entscheidungen berücksichtigt werden. Die EVNM-PV (FGSV (2022)) benennen die in Tabelle 2 dargestellten verkehrsrelevanten Entscheidungen und ihre Zuordnung zu Modelltypen im Personenverkehr.

Modelltyp	Teilmodelle
Flächennutzungsmodelle	Standortwahl
Mobilitätswerkzeugwahlmodelle (oder Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodelle)	Fahrzeugbeschaffungswahl
	Zeitkartenbeschaffungswahl
Verkehrsnachfragemodelle	Verkehrserzeugung (oder Aktivitätenwahl)
	Zielwahl (oder Verkehrsverteilung)
	Moduswahl (oder Verkehrsaufteilung)
	Abfahrtszeitwahl
	Routenwahl (mit Umlegungsmodell)
Verkehrsflussmodelle	Geschwindigkeitswahl
	Fahrstreifenwahl
	Fahrzeugfolgeabstandwahl

Tabelle 2: Verkehrsrelevante Entscheidungen und ihre Abbildung in Verkehrsmodellen des Personenverkehrs nach den EVNM-PV (FGSV (2022)) ergänzt um alternative gebräuchliche Bezeichnungen.

Im Fokus dieser Arbeit stehen Verkehrsnachfragemodelle. Die entsprechend Tabelle 2 diesem Modelltyp zugeordneten Entscheidungsschritte beruhen auf den nach BATES (2008) in den 1950er Jahren in den USA entwickelten Grundlagen der Verkehrsnachfragemodellierung. Der daraus entstandene Vier-Stufen-Algorithmus beinhaltet die sequentiell abgearbeiteten Teilmodelle bzw. Modellstufen der Verkehrserzeugung, Zielwahl, Moduswahl und Routenwahl.

Kritik am sequentiellen Vier-Stufen-Algorithmus ist verbreitet und in Aspekten berechtigt (ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011)). Sowohl BATES (2008) als auch ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011) weisen jedoch darauf hin, dass auch aktuelle Entwicklungen in der Verkehrsnachfragemodellierung oftmals eine Weiterentwicklung dieses klassischen Vier-Stufen-Algorithmus sind und keine grundsätzlich neuen Ansätze darstellen („[...] the development of the mainstream techniques has been evolutionary rather than revolutionary.“ (BATES (2008, S. 11))). Daher lassen sich Unterschiede und

Gemeinsamkeiten auch neuerer, komplexerer Modelle zumeist gut an der Modellstruktur des Vier-Stufen-Algorithmus veranschaulichen und nachvollziehen.

Abbildung 1 zeigt schematisch den Berechnungsablauf eines klassischen Verkehrsnachfragemodells, das dem Vier-Stufen-Algorithmus folgt. Inclusive der Erweiterung um die Abfahrtszeitwahl werden in den einzelnen Stufen die folgenden Fragen beantwortet:

- Verkehrserzeugung: Wie viele Wege beginnen bzw. enden je Quelle bzw. Ziel?
- Zielwahl: Von welcher Quelle zu welchem Ziel werden die Wege durchgeführt?
- Moduswahl: Welcher Modus wird für die Ortsveränderung gewählt?
- Abfahrtszeitwahl: Zu welcher Zeit wird ein Weg durchgeführt?
- Routenwahl: Welche Route oder Verbindung wird gewählt?

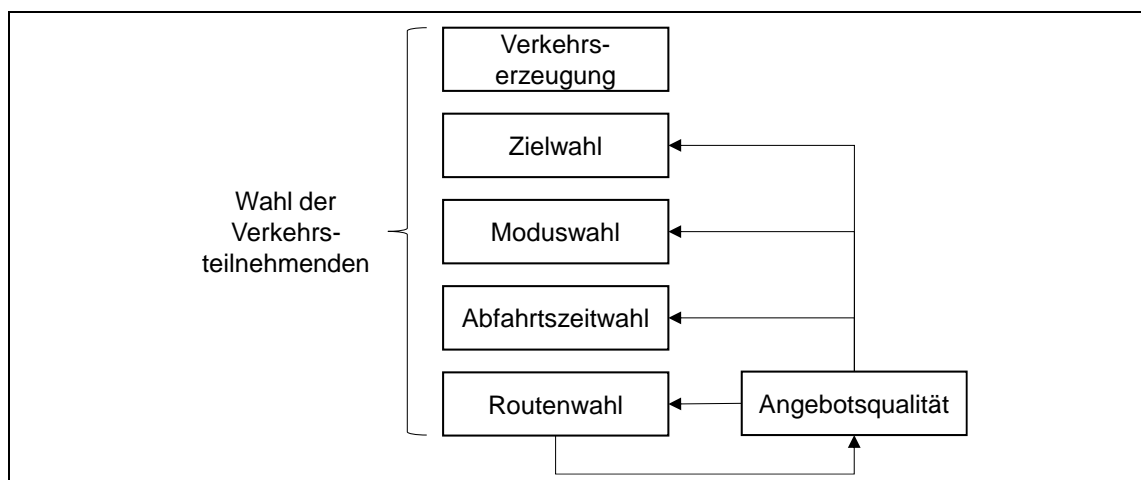


Abbildung 1: Um Abfahrtszeitwahl erweiterter Vier-Stufen-Algorithmus mit Rückkopplung zwischen Angebot und Nachfrage.

Wie beispielsweise in den EVNM-PV (FGSV (2022)) erläutert, wird die Routenwahl unter Zuhilfenahme eines Umlegungsmodells berechnet. Da sich Individualverkehr (IV) und öffentlicher Verkehr (ÖV) in ihrer Charakteristik teils stark unterscheiden, werden unterschiedliche Umlegungsmodelle verwendet. Für vertiefende Informationen zu IV- und ÖV-Umlegungsmodellen und ihre Besonderheiten sei auf die EVNM-PV (FGSV (2022)) verwiesen. Grundlegend lässt sich zusammenfassen, dass in dieser Modellstufe die Nachfrage der Verkehrsteilnehmenden auf verfügbare Routen oder Verbindungen verteilt wird, sodass anschließend die Verkehrsstärken je Netzelement und Verkehrsmittel berechnet werden können. Die Auslastungen der Netzelemente haben Einfluss auf Eigenschaften der Alternativen, die wiederum relevant für die Wahlentscheidungen der Verkehrsteilnehmenden sind. Eine hohe Auslastung im IV erhöht beispielsweise die Fahrzeit und eine hohe Auslastung im ÖV mindert den Komfort oder die Nutzbarkeit einer Alternative. Typischerweise wird mindestens der im IV beobachtete Effekt der Erhöhung der Fahrzeit bei erhöhter Auslastung eines Netzelements mittels so genannter Capacity-Restraint-Funktionen berücksichtigt. Um die Wechselwirkungen zwischen Nutzung und Nutzen einer Routenalternative zu berücksichtigen, werden in Umlegungsmodellen

Rückkopplungen in Form von Iterationen durchgeführt. Da Änderungen von Alternativeneigenschaften wie beispielsweise Fahrtzeiten im IV nicht nur innerhalb der Routenwahl, sondern auch in voranstehenden Modellstufen von Relevanz sind, wird eine weitere Rückkopplung in das Gesamtmodell integriert (vgl. Pfeilverbindungen in Abbildung 1). Die auf Grundlage der durch die Verkehrsnachfrage erzeugten Verkehrsstärken geänderte Angebotsqualität geht in einem nächsten Iterationsschritt so in die Nutzenfunktionen der der Routenwahl vorgelagerten Wahlmodelle ein. (EVNM-PV (FGSV (2022)), ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011))

Als Abbruchkriterium der Rückkopplung sowohl zwischen den Modellstufen als auch innerhalb der Routenwahl und des Umlegungsmodells kann jeweils zum einen eine maximale Iterationsanzahl dienen und zum anderen das Erreichen eines Gleichgewichtszustands. Dieser Gleichgewichtszustand ist dann erreicht, wenn sich die Struktur der Verkehrsnachfrage oder die Matrizen der Angebotsqualität, beispielsweise die Reisezeitmatrix, zwischen zwei Iterationsschritten nicht mehr ändert (EVNM-PV (FGSV (2022))). Dem Gleichgewichtszustand zugrunde liegt die Verhaltensannahme, dass die Verkehrsteilnehmenden über die zu erwartende Verkehrslage im Netz informiert sind und ihre Entscheidungen so anpassen und beibehalten, dass die auslastungsabhängigen Alternativeneigenschaften zwischen aufeinanderfolgenden Tagen konstant bleiben (EVNM-PV (FGSV (2022))). In der Praxis müssen Konvergenzmaße ermittelt und Grenzwerte zu tolerierender Abweichungen zwischen den Iterationsschritten festgelegt werden (siehe dazu EVNM-PV (FGSV (2022)) oder SCHNABEL ET AL. (1997)). ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011) geben einen Überblick über Lösungsverfahren und Konvergenzproblematiken bei der Gleichgewichtsmodellierung in der Umlegung und zwischen Modellstufen.

Nicht in allen Modellstufen werden typischerweise Wahlmodelle (vgl. Kapitel 2.1.1) verwendet, um Entscheidungen der Verkehrsteilnehmenden abzubilden. Verkehrserzeugung und Abfahrtszeitwahl werden oftmals vereinfacht mittels fester Häufigkeiten oder Anteile berechnet (EVNM-PV (FGSV (2022))). Ebenso ist modellabhängig, welche Modellstufen mittels einer Rückkopplung oder durch simultane Berechnung verknüpft werden. Für detaillierte Informationen zu den Modellstufen und zugehöriger Berechnungsmethoden sei auf ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011), SCHNABEL ET AL. (1997) oder EVNM-PV (FGSV (2022)) verwiesen. Im Folgenden wird ein grundlegender kontrastierender Überblick über Modelleigenschaften makroskopischer und mikroskopischer Verkehrsnachfragemodelle gegeben.

2.1.4 Makroskopische und mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle

Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Verkehrsnachfragemodelle, die aufgrund ihres spezifischen Untersuchungsgebiets, der Fragestellungen, die sie beantworten sollen, ihres Aggregationsgrads und insbesondere ihrer jeweiligen Modellierungsmethoden (je Modellstufe und insgesamt) sehr individuell sind. Für die vorliegende Arbeit ist

vorrangig die Abgrenzung von mikroskopischen zu makroskopischen Modellierungsmethoden von Bedeutung.

In der Literatur werden unterschiedliche Bezeichnungen für die Differenzierung von mikroskopischen und makroskopischen Modellen genutzt. Zum einen wird zwischen aggregiert und disaggregiert unterschieden. Zum anderen werden mikroskopische Modelle im englischsprachigen Gebrauch häufig als ABM bezeichnet, wobei diese Abkürzung sowohl für activity-based models (aktivitätenbasierte Modelle) als auch für agent-based models (agentenbasierte Modelle) verwendet wird.

Die kontrastierende Bezeichnung mikroskopischer Modelle als aktivitätenbasierte Modelle ist insofern irreführend, dass sie impliziert, makroskopische Modelle seien grundsätzlich nicht aktivitätenbasiert. In aktuellen makroskopischen Modellierungsansätzen wird jedoch ebenfalls berücksichtigt, dass das Bedürfnis, aushäusigen Aktivitäten nachzugehen, der Auslöser für Ortsveränderungen ist (EVNM-PV (FGSV (2022))). Es ist wichtig festzustellen, dass eine makroskopische Modellierungsweise heutzutage nicht per se mit dem sequentiellen Vier-Stufen-Algorithmus gleichzusetzen ist, der beispielsweise, wie BATES (2008) erläutert, in seiner Grundform auch keine Rückkopplung zwischen Angebot und Nachfrage berücksichtigt. Einen Überblick über mögliche Modellausprägungen geben die EVNM-PV (FGSV (2022)).

Der Aggregations- und auch Abstraktionsgrad eines Verkehrsnachfragemodells kann in diversen Teilbereichen variieren. Tabelle 3 zeigt, inhaltlich größtenteils entnommen aus den EVNM-PV (FGSV (2022)), eine Differenzierung typischer Ausprägungen des Abstraktions- und Aggregationsgrads mikroskopischer und makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle.

Teilbereich	Mikroskopische Abbildung	Makroskopische Abbildung
Personen, Nachfrage	<ul style="list-style-type: none"> • Diskrete Objekte (Agenten), beschrieben durch Attribute (z.B. Wohnort, Pkw-Besitz) 	<ul style="list-style-type: none"> • Inhaltlich: verhaltenshomogene Personengruppen • Räumlich: Verkehrszellen
Wahlentscheidungen, Ortsveränderungen, Verkehrsstärken	<ul style="list-style-type: none"> • Jeder Agent wählt je genau eine Alternative. Die Wahlentscheidungen und Eigenschaften je Agent werden zufallsbasiert und auf Grundlage von Wahrscheinlichkeitsverteilungen durchgeführt (z.B. Monte-Carlo-Methode) (ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011)). • (Zwischen-) Ergebnis sind Ortsveränderungen einzelner Personen und somit ganzzahlige Werte. • Verkehrsstärken entsprechen der Summe der Agenten, die ein Netzelement nutzen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachfrage wird entsprechend Wahrscheinlichkeitsberechnungen anteilig auf Alternativen aufgeteilt. • (Zwischen-) Ergebnis sind Erwartungswerte der Wahlmodelle und daher reelle Zahlen. • Verkehrsstärken eines Netzelements entsprechen der Summe der Verkehrsstärken der Routen, die über dieses Element führen.
Verkehrsangebot	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsangebotsmodelle sind nicht systematisch verschieden für makroskopische und mikroskopische Nachfragemodellierung. • Der Detaillierungsgrad der Abbildung der Netzelemente beeinflusst Modus- und Routenwahl und ist abhängig von der notwendigen Abbildungsgenauigkeit (bspw. ÖV-Angebot als vereinfachtes Liniennetz mit Fahrzeiten oder mit exaktem Fahrplan). 	
Verkehrszustand (Verkehrsfloßmodell)	<ul style="list-style-type: none"> • Position und Geschwindigkeit einzelner Fahrzeuge (Objekte) ist bekannt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung mittlerer Geschwindigkeit aus Verkehrsstärke (vgl. Capacity-Restraint-Funktion).
Erfahrung und Gedächtnis	<ul style="list-style-type: none"> • Jeder Agent kann auf ein Gedächtnis zurückgreifen, in dem Erfahrungen (z.B. Reisezeiten) aus vorangegangenen Tagen gespeichert werden. Auch Entscheidungen vorheriger Modellstufen können je Agent zugeordnet werden. • Rückkopplungen zwischen den Modellstufen können somit durch die Nachbildung eines Lernprozesses je Agent realisiert werden. Im Zusammenspiel mit den Entscheidungen der anderen Verkehrsteilnehmenden ergibt sich ein Verkehrszustand, der als Grundlage der Entscheidungen der nächsten Iteration dient. • Entscheidungen im Kontext des Haushalts können abgebildet werden (z.B. welche Person benutzt das Fahrzeug des Haushalts). 	<ul style="list-style-type: none"> • Aktuelle und historische Kenngrößen werden in einer Matrix je Quelle-Ziel-Relation oder in der Umlegung je Route gespeichert. Alle Personen greifen auf dieselben Kenngrößen (z.B. Reisezeiten) zurück. • Rückkopplungen zwischen Modellstufen werden nicht auf individueller Ebene, sondern auf Ebene der Quelle-Ziel-Relationen betrachtet. Ein Gleichgewichtszustand wird dadurch definiert, dass sich Nachfragestruktur oder Reisezeitmatrix zwischen zwei Iterationsschritten nur noch minimal ändern. • Entscheidungen der Verkehrsteilnehmenden als Einzelpersonen aus vorherigen Modellstufen stehen nachfolgend nicht unmittelbar zur Verfügung, sondern müssen bei Bedarf als Gruppen angelegt werden.

Tabelle 3: Differenzierung des Abstraktions- und Aggregationsgrads mikroskopischer und makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle. Leicht angepasst und ergänzt sowie tabellarisch aufgearbeitet nach den EVNMPV (FGSV (2022)).

Für die in dieser Arbeit relevante Unterscheidung in mikroskopische und makroskopische Modelle ist insbesondere der Aggregationsgrad der modellierten Verkehrsnachfrage von zentraler Bedeutung. Durch die unterschiedliche Interpretation der Verkehrsnachfrage durch die Modelltypen ist keine direkte Übertragung mikroskopischer Ansätze in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle möglich. Generell bilden die Modelle stets einen bestimmten Zeitraum ab. Dieser Zeitraum beträgt typischerweise einen Tag (EVNM-PV (FGSV (2022))). Im Rahmen dieser Arbeit wird dementsprechend, wenn nicht anders vermerkt, jeweils ein Tag als Bezugszeitraum angenommen. Grundsätzlich lassen sich die Erläuterungen und Methoden jedoch auf andere abgebildete Zeiträume übertragen.

Mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle simulieren diskrete Entscheidungen von Personen anhand von Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Jeder Modelllauf bildet dabei die Nachfragesituation eines (beliebigen und zufällig gewählten) spezifischen Tages nach. Üblicherweise werden den Personen Tagespläne zugeordnet, die chronologisch abgearbeitet werden. Durch ihre Art der Modellierung können mikroskopische Modelle grundsätzlich besser dazu genutzt werden, komplexe Entscheidungssituationen abzubilden. Aufgrund der zufallsbasierten Berechnungsweise ist jedoch auch eine hohe Anzahl an Berechnungsläufen notwendig, um ein statistisch abgesichertes Ergebnis zu erhalten. In Kombination mit dem höheren Aufwand und größeren Datenbedarf bei Modellerstellung ist diese Anforderung bei der Abwägung zwischen den beiden Modellarten Makroskopisch und Mikroskopisch zu berücksichtigen. (ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011), EVNM-PV (FGSV (2022)))

Makroskopische Verkehrsnachfragemodelle zielen im Gegensatz zu mikroskopischen Ansätzen darauf ab, einen durchschnittlichen Tag nachzubilden. Es steht nicht der Verhaltensprozess einzelner Personen, sondern die Abbildung deren aggregierter Reaktionen im Zentrum des Interesses (siehe beispielsweise MCNALLY UND RINDT (2008)). Das wird durch die Verwendung durchschnittlicher Erzeugungsraten für generierte Wege (siehe dazu die EVNM-PV (FGSV (2022)) oder SCHNABEL ET AL. (1997)) und durch die Zuweisung von Wahrscheinlichkeiten für jede Alternative einer Entscheidungssituation erreicht. Das Ergebnis sind Werte, die den reellen Zahlen zuzuordnen sind und die die Nachfragesituation eines wiederkehrenden durchschnittlichen Tages darstellen. Ein wichtiger Unterschied von makroskopischen zu mikroskopischen Verkehrsnachfragemodellen ist, dass makroskopische Modelle in einem Berechnungslauf mit Rückkopplungen eine eindeutige, reproduzierbare Lösung erzeugen (EVNM-PV (FGSV (2022))).

Zur vertiefenden Lektüre sei allgemein auf ORTÚZAR UND WILLUMSEN (2011) sowie für mikroskopische Verkehrsnachfragemodellierung beispielhaft auf die detaillierten Erläuterungen von HORNI ET AL. (2016b), insbesondere die Kapitel HORNI ET AL. (2016a), FLÖTTERÖD (2016) und FLÖTTERÖD UND KICKHÖFER (2016), verwiesen.

2.2 Systemeigenschaften geteilter Fahrzeugflotten

Geteilte Fahrzeugflotten werden genutzt, um Sharingangebote zu schaffen. Im Folgenden wird mit Bezug auf die Verkehrsnachfragemodellierung auf Eigenschaften dieser Angebote eingegangen. Kapitel 2.2.1 definiert die in dieser Arbeit modellierten Angebotsformen. In den darauffolgenden Kapiteln wird auf die mit diesen Angebotsformen einhergehenden Kenngrößen und ihre Abbildung in Verkehrsnachfragemodellen eingegangen. Dabei werden die drei Gruppen verkehrliche Kenngrößen (Kapitel 2.2.2), Kosten (Kapitel 2.2.3) sowie weitere Kenngrößen und Zeitwertsätze (Kapitel 2.2.4) unterschieden.

2.2.1 Modellierte Angebotsformen

Die im Fokus dieser Arbeit stehenden Sharingangebote werden wie folgt in die Angebotsformen Carsharing und Ridesharing unterteilt.

- **Carsharing:** Das Teilen der Fahrzeuge erfolgt nacheinander. Je Fahrtwunsch wird, wenn möglich, eine Fahrzeugfahrt angeboten. Quelle, Ziel und Zeitpunkt der Fahrt werden durch die Nachfrage bestimmt. Um Fahrzeuge vom Ziel einer vorangehenden Fahrt zur Quelle ihrer nächsten Fahrt umzusetzen, werden Leerfahrten generiert. Der betriebliche Prozess, der Fahrzeuglastfahrten durch Leerfahrten verbindet, ist die Umlaufbildung der Fahrzeuge.
- **Ridesharing:** Das Teilen der Fahrzeuge kann auch gleichzeitig durch voneinander unabhängige Personen innerhalb einer Fahrzeugfahrt erfolgen. Das führt im Vergleich zu Carsharing zu der Ergänzung, dass sich Fahrgäste, die einen ähnlichen Weg haben, bei passender räumlicher und zeitlicher Lage eine Fahrzeugfahrt teilen. Zur Mitnahme weiterer Fahrgäste werden bis zu einem gewissen Grad Umwege in Kauf genommen. Der betriebliche Prozess, der hinter dieser Abgrenzung von Ridesharing zu Carsharing steht, ist die Bündelung der Personennachfrage in Fahrzeuglastfahrten.

In zweiter Instanz muss berücksichtigt werden, dass Car- und Ridesharing auf zwei Arten genutzt werden können: direkt oder als Zubringer zu fahrplangebundenen Verkehrsmitteln des ÖV. Dabei kann das Angebot in den ÖV integriert werden oder in Konkurrenz dazu angeboten werden (siehe Abbildung 2).

- **Direktes Angebot:** Car- oder Ridesharing wird als einziges Verkehrsmittel von Quelle zu Ziel genutzt. Das Sharingangebot kann in Konkurrenz zum ÖV oder als Teil des ÖV angeboten werden. In den ÖV integriert kann das Sharingangebot in Abhängigkeit des bestehenden fahrplangebundenen ÖV räumlich oder zeitlich begrenzt und in das ÖV-Tarifsystem eingebunden werden.

- In den ÖV integriertes Zubringer-Angebot: Car- oder Ridesharing wird für einen Teilweg von oder zu fahrplangebundenen Verkehrsmitteln genutzt. Das setzt eine enge Abstimmung mit Abfahrt und Ankunft fahrplangebundener Verkehrsmittel voraus.

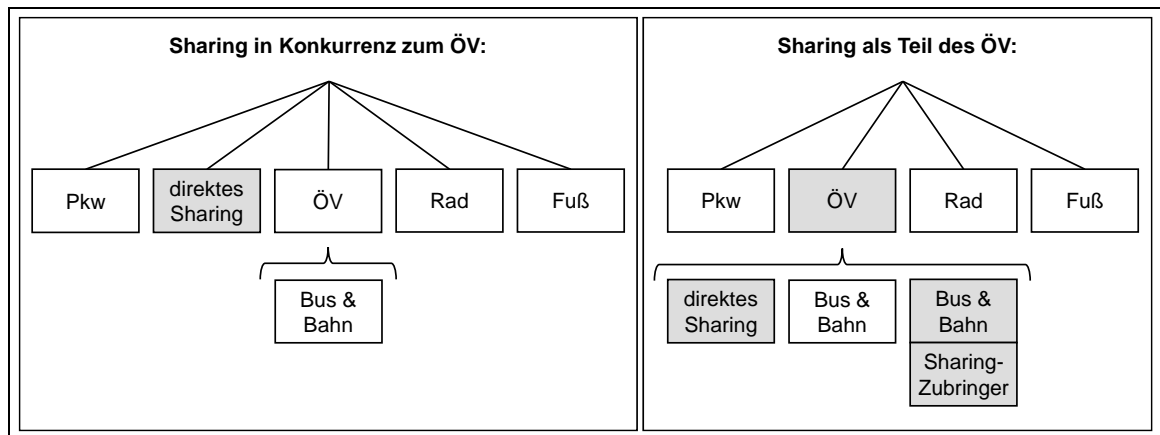


Abbildung 2: Beispielhafte Moduswahl mit Sharingangeboten in Konkurrenz zum ÖV (links) oder in den ÖV integriert (rechts).

Im Folgenden werden einige Grundlagen der verwendeten Begriffe und betrachteten Angebotsformen erläutert. In Literatur und Praxis ist eine weitaus größere Bandbreite an Bezeichnungen und Angebotsausprägungen zu finden, deren Erläuterung an dieser Stelle jedoch nicht zielführend ist. Zugleich sollen die hier nicht erläuterten Begriffe wie beispielsweise Rideselling, Ridehailing, Ridesourcing, Mobility on Demand, Mobility as a Service, Shared-Ride Services, Robo-Taxis oder Carpooling sowie andere als die genutzten Definitionen der verwendeten Begriffe keinesfalls als ungerechtfertigt oder falsch dargestellt werden. Der Fokus liegt darauf, eine Grundlage zum Verständnis der Methoden und Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zu schaffen.

Neuartige Angebotsformen, die auf geteilten Fahrzeugflotten beruhen, sind vor allem in den letzten Jahren in den Fokus der öffentlichen Aufmerksamkeit getreten. Dieser Trend, der in vielen (Pilot-) Projekten Ausprägung findet (siehe beispielsweise FOLJANTY (2020) für eine Übersicht zu weltweiten Ridesharingangeboten), ist untrennbar mit der Digitalisierung und der Aussicht auf vollautomatisierte Fahrzeuge verbunden (FGSV (2021)). Aufgrund der relativen Neuheit des breiten öffentlichen Interesses und der Diversität der Angebote haben sich bisher weder in Forschung noch Praxis eindeutige Benennungen zur Abgrenzung der Angebotsformen durchgesetzt. Darüber hinaus ist eine trennscharfe Abgrenzung auch zu schon länger existierenden flexiblen Bedienformen im öffentlichen Verkehr und dem Taxiverkehr nicht immer einfach zu treffen.

Verkehrsteilnehmende können Fahrzeuge einer geteilten Flotte je nach Bedarf und Verfügbarkeit für individuelle Fahrtwünsche nutzen. Hierbei kann es sich neben Pkw auch um Fahrräder, Motorroller, E-Scooter oder ähnliches handeln (BMVI (2021)). Grundsätzlich kann aus Sicht der Nutzenden insbesondere in Bezug auf Pkw zwischen sequentiellem und simultanem Teilen der Fahrzeuge bzw. Fahrzeugfahrten unterschieden werden. Werden die Fahrzeuge nacheinander von verschiedenen Personen genutzt, kann

das als Fahrzeugsharing oder bezogen auf Pkw als Carsharing bezeichnet werden. Teilen hingegen mehrere, voneinander unabhängige Personen das Fahrzeug zur gleichen Zeit, wird nicht nur das Fahrzeug, sondern auch die Fahrt geteilt. Als Bezeichnung bietet sich hier kontrastierend der Begriff Fahrtsharing oder auch Ridesharing an. Sowohl das BMVI (2021) als auch die Literaturlauswertungen von NARAYANAN ET AL. (2020) und SOTEROPOULOS ET AL. (2019) nutzen diese Art der Unterscheidung und Begrifflichkeit.

Entsprechend der Untergliederung des BMVI (2021) wird im Carsharing ferner zwischen stationsgebundenen und nicht stationsgebundenen (free-floating) Angeboten unterschieden, je nachdem, ob zu einer Station zurückgekehrt werden muss oder auch Einwegfahrten ermöglicht werden. Ridesharing wird in private und kommerzielle Angebote unterteilt. Im privaten Ridesharing nimmt eine autofahrende Person weitere Reisende entgeltlich oder unentgeltlich im eigenen privaten Pkw mit. Im kommerziellen Ridesharing erfolgt die Beförderung durch professionelle Anbieter, die Fahrtwünsche verschiedener Personen, wenn möglich, zu geteilten Fahrzeugfahrten bündelt. Als eine dem Sharing verwandte Angebotsform wird das Taxi genannt. (BMVI (2021))

Die vom BMVI (2021) als kommerzielles Ridesharing benannte Angebotsform wird in den Hinweisen für Kenngrößen zur Beschreibung und Bewertung von Ridepooling-Systemen H KRipoo (FGSV (2021)) als Ridepooling benannt. Die H KRipoo (FGSV (2021)) befassen sich unter anderem mit der Abgrenzung dieser Angebotsform von bereits länger bestehenden flexiblen Angeboten des öffentlichen Verkehrs wie beispielsweise Rufbussen und Sammeltaxis (siehe dazu SOMMER ET AL. (2016)). Besonders wenn diese im fahrplanfreien Flächenbetrieb betrieben werden, sind die Unterschiede zu „neuartigem“ Ridepooling (bzw. kommerziellem Ridesharing nach BMVI (2021)) gering und schwinden, wenn mit virtuellen Haltestellen gearbeitet wird und Fahrgäste nicht mehr von Haustür zu Haustür befördert werden (H KRipoo (FGSV (2021))). Einen zentralen Unterschied stellt jedoch die meist implizit angenommene weite Verbreitung des Angebots und die damit verbundene Höhe von Nachfrage und Angebot dar. In der Praxis lassen sich diese Größenordnungen bisher in Deutschland nicht beobachten. Tendenzen dieser Richtung lassen sich bei US-amerikanischen Unternehmen erkennen, die unter anderem auf vollautomatisierte Fahrzeuge setzen (H KRipoo (FGSV (2021))).

Unter Betrachtung der möglichen Verbreitung vollautomatisierter, also fahrerlos fahrender Fahrzeuge, verschiebt sich die Abgrenzung der Angebotsformen leicht. Es kann weiterhin zwischen Fahrzeugsharing (Carsharing) und Fahrtsharing (Ridesharing) unterschieden werden. Beim Carsharing tritt nun die stationsgebundene Angebotsform in den Hintergrund, da fahrerlose Leerfahrten kostengünstiger möglich sind. Da die Fahraufgabe auch während der Nutzung wegfällt, ist die Fahrt aus Sicht der Nutzenden eher mit einer Taxifahrt vergleichbar. Dadurch ist die Nutzung auch für Verkehrsteilnehmende ohne Führerschein möglich. In Bezug auf Ridesharing ändert sich die Wahrnehmung nicht so drastisch wie in Bezug auf Carsharing, da hier auch in konventionellen Fahrzeugen keine Fahraufgabe durch die Mitfahrenden ausgeführt wird. Aus Anbietersicht werden beide Geschäftsmodelle mit voll automatisierten Fahrzeugen aufgrund der entfallenden Kosten für Fahrpersonal zumeist als rentabler erwartet (siehe Kapitel 2.2.2).

Zentrales gemeinsames Merkmal von Sharingangeboten, das sie vom klassischen, fahrplan- und liniengebundenen öffentlichen Verkehr abgrenzt, ist, dass Fahrzeugfahrten vom individuell und kurzfristig angemeldeten Bedarf der Verkehrsteilnehmenden bestimmt werden. Das gilt sowohl in Bezug auf Abholort und Zielort als auch in Bezug auf den Zeitpunkt der Fahrt. Dem Englischen entlehnt werden sie daher auch als On-Demand-Angebote bezeichnet, zu denen auch der klassische Taxiverkehr zählt (H KRipoo (FGSV (2021))), dem fahrerloses Carsharing sehr ähnlich ist.

Im Zuge dieser Arbeit werden die entsprechend BMVI (2021) geprägten Begriffe Carsharing und Ridesharing als die zwei grundlegenden Ausgestaltungsformen der auf geteilten Fahrzeugflotten beruhenden Angebote verwendet. Beide Fälle basieren auf einer kommerziellen bzw. geschäftsmäßigen Beförderung der Mitfahrenden. In Bezug auf Carsharing wird eine nicht stationsbasierte Angebotsform zugrunde gelegt, sodass sowohl für Car- als auch Ridesharing ausgleichende Leerfahrten benötigt werden.

Die Unterscheidung, ob das Angebot mit fahrerlosen oder konventionellen Fahrzeugen erbracht wird, hat vorrangig Auswirkungen auf die Betriebskosten, das Fahrverhalten und im Fall von Carsharing, ob ein Führerschein zur Nutzung benötigt wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird von zu konventionellen Fahrzeugen identischem Fahrverhalten ausgegangen. Zudem wird zugrunde gelegt, dass allen Personen die Nutzung von Sharingangeboten möglich ist, wenn diese räumlich und zeitlich verfügbar sind. Für vertiefende Informationen dazu, wie Auswirkungen eines angepassten Fahrverhaltens automatisierter Fahrzeuge makroskopisch modelliert werden können, sei beispielsweise auf SONNLEITNER ET AL. (2022) verwiesen. Kosten bzw. Preise stellen eine Kenngröße des Angebots dar und werden entsprechend als Eingangsgröße der Modellrechnungen berücksichtigt. Es wird neben Ridesharing auch für Carsharing von einem taxiähnlichen Abholverhalten ausgegangen, das aufgrund des ansonsten sehr hohen Personalaufwands für Umsetzfahrten so vorrangig in fahrerlosen Carsharingszenarien Anwendung findet.

2.2.2 Verkehrliche Kenngrößen des Angebots

Als grundlegende Festlegung bezüglich eines zu modellierenden Sharingangebots sind die räumliche und zeitliche Verfügbarkeit der Fahrzeugfahrten zu nennen. Die räumliche Verfügbarkeit wird dabei durch das Bedienebiet bestimmt, die zeitliche Verfügbarkeit in Form der Betriebszeiten. Unter Umständen steht die Verfügbarkeit in Abhängigkeit des Angebots fahrplangebundener öffentlicher Verkehrsmittel. Über diese Angaben, die die Verfügbarkeit als Verkehrsmittel- oder Moduswahlalternative grundsätzlich festlegen, hinausgehend, lässt sich eine Vielzahl von Kenngrößen bestimmen.

Kenngrößenberechnungen dienen zum einen dazu, Wahlentscheidungen der Verkehrsteilnehmenden nachzuvollziehen bzw. abzuschätzen (vgl. diskrete Wahlmodelle Kapitel 2.1.1). Zum anderen dienen sie dazu, betriebsseitige Bewertungen zur Effizienz des Systems zu ermöglichen. Die H KRipoo (FGSV (2021)) befassen sich mit verkehrlichen Kenngrößen von Ridesharingsystemen und leiten diese aus bereits etablierten Kriterien

fahrplangebundener Angebote ab. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf Kenngrößen der Reisezeitbestandteile. Tabelle 4 enthält eine Zusammenstellung von in den H KRipoo (FGSV (2021)) identifizierten verkehrlichen Kenngrößen samt Zuordnung in die Kategorien

- Anwendbar für direkte Sharingangebote oder Zubringer,
- Messbar bereits während der Planung oder erst mit Betriebsdurchführung und
- Abbildbar im beispielhaften makroskopischen Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart (VRS-Modell, siehe Kapitel 3.2).

Für eine detaillierte Erläuterung und Beschreibung der Kenngrößen im Vergleich zu klassischen fahrplangebundenen öffentlichen Verkehrsmitteln sei auf die H KRipoo (FGSV (2021)) verwiesen.

Themenbereich/ Kenngröße	Kenngrößenausprägung	Angebotsform		Messbarkeit		
		Sharing direkt	Sharing als Zubringer	Während Planung	Mit Betriebsdurchführung	Abbildung in erweitertem VRS-Modell
Reisezeit	gesamt	x	x	x		x
Beförderungszeit	im Fahrzeug	x	x	x		x
Entfernung zu Haltestellen	Zugangszeit/-weite	x	x	x		x
	Abgangszeit/-weite	x	x	x		x
Umstiege	Umsteigegezeit		x	x		x
	Umsteigewartezeit		x	x		x
	Umsteigehäufigkeit		x	x		x
Zeitliche Verfügbarkeit	Wartezeit am Start-/Zielort	x	x	x		
	Wartezeit an der Starthaltestelle	x	x	x		x
	Fahrtenhäufigkeit/Takt	x	x	x		x
Zuverlässigkeit/ Verlässlichkeit	Anteil ausgefallener Fahrten	x	x		x	
	Anteil nicht erreichter Anschlussfahrten		x		x	
	Pünktlichkeit	x	x		x	
Betriebsseitige Systemeffizienz	Umwegfaktor (nur Ridesharing)	x	x		x	x
	Besetzungsgrad (nur Ridesharing)	x	x		x	x
	Leerkilometeranteil	x	x		x	x

Tabelle 4: Verkehrliche Kenngrößen von Car- und Ridesharingangeboten. Eigene Zusammenstellung auf inhaltlicher Grundlage der H KRipoo (FGSV (2021)) und ergänzt um Angaben zu Sharingangebotsform und Messbarkeit im makroskopischen Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart (VRS-Modell, siehe Kapitel 3.2).

2.2.3 Kosten

Kosten werden im Rahmen der H KRipoo (FGSV (2021)) und im vorangehenden Kapitel nicht betrachtet, da es sich um keine verkehrliche Kenngröße handelt. Fahrtkosten stellen in der Nachfragemodellierung jedoch ein zentrales Attribut der Moduswahl dar. Die betriebsseitigen Kosten und die damit für Nutzende verbundenen Preise der Sharingangebote sind ein Eingangsattribut der Verkehrsnachfragemodellierung, können jedoch für weitverbreitete und fahrerlose Sharingangebote noch nicht auf Grundlage realer Angebote bestimmt werden. Wie beispielsweise in den H KRipoo (FGSV (2021)) wird oftmals das fahrerlose Fahren als Schlüssel zum eigenwirtschaftlichen Betrieb der Car- oder Ridesharingangebote gesehen. RECK UND AXHAUSEN (2020) zeigen in ihren Berechnungen, dass aktuelle Kosten für Ridesharing-Zubringer beispielsweise auch die Nutzengewinne durch Zeitersparnis für einen Großteil der Wege übersteigen. In Bezug auf Subventionen und mit Blick auf verschiedene Einkommensklassen der Verkehrsteilnehmenden kommen sie zu dem Schluss, dass es zu einer möglichst gerechten Lösung führt, wenn Ridesharing-Zubringer bei vorangehender oder nachfolgender Nutzung des klassischen ÖV kostenlos angeboten werden (RECK UND AXHAUSEN (2020)).

Sowohl NARAYANAN ET AL. (2020), PERNESTÅL UND KRISTOFFERSSON (2019) als auch KUHNIMHOF UND EISENMANN (2021) geben jeweils einen Überblick über Literatur, in der Kosten insbesondere vollautomatisierter Car- und Ridesharingangebote kalkuliert werden. NARAYANAN ET AL. (2020) kommen zu dem Schluss, dass die Kosten vollautomatisierter Car- und Ridesharingangebote in der untersuchten Literatur zwischen 0,11 Dollar und 1,03 Dollar je Personenkilometer liegen. PERNESTÅL UND KRISTOFFERSSON (2019) finden Kosten, die für Carsharing überwiegend im Bereich von 0,25 bis 0,53 Euro je Personenkilometer und für Ridesharing bei etwa 0,13 bis 0,39 Euro je Personenkilometer liegen. In ihrem auf Deutschland und Europa fokussierten Literaturüberblick finden KUHNIMHOF UND EISENMANN (2021) untere Kostengrenzen für vollautomatisierte Fahrzeuge von 0,11 Euro je Personenkilometer im Ridesharing und 0,25 Euro je Personenkilometer im Carsharing. Die unteren Grenzen für Ridesharing liegen damit in derselben Größenordnung wie durchschnittliche Kosten für Fahrgäste im öffentlichen Verkehr. Die entsprechenden Kosten für Carsharing sind vergleichbar mit den durchschnittlichen Kosten je Pkw-Kilometer in Deutschland (KUHNIMHOF UND EISENMANN (2021)).

NARAYANAN ET AL. (2020) und PERNESTÅL UND KRISTOFFERSSON (2019) weisen jedoch ebenso wie BÖSCH ET AL. (2018) darauf hin, dass in vielen Studien Kosten für Overhead, Parken, Wartung und Reinigung nicht eingehen. BECKER ET AL. (2020) nutzen die in ihren Augen derzeit umfassendste Methodik zur Kostenabschätzung nach BÖSCH ET AL. (2018), um Kosteneffekte elektrischer Antriebe und vollautomatisierter Fahrzeuge auf Pkw, Taxis/Carsharing, Ridesharing und fahrplangebundene öffentliche Verkehrsmittel im weltweiten Kontext zu differenzieren. Für Berlin finden die Autoren, dass die Kosten für Taxi/Carsharing und Ridesharing bei voller Automatisierung und elektrischem Antrieb um 84 bzw. 83 Prozent im Vergleich zu Kosten bei Einsatz konventioneller

Fahrzeuge sinken, wodurch sich die Kosten stark denen fahrplangebundener Busse annähern (BECKER ET AL. (2020)).

Auch wenn erwartet wird, dass die durchschnittlichen Kosten von Carsharing und Ridesharing insbesondere aufgrund von Automatisierung stark sinken, zeigen KUHNIMHOF UND EISENMANN (2021), dass neben den durchschnittlichen Kosten auch die Verteilung der Pkw-Kosten über gefahrene Fahrzeugkilometer für mögliche modale Verlagerungen eine zentrale Rolle spielt. Sie prognostizieren unter der Annahme einer rein kostenbasierten Moduswahl erst bei Preisen von maximal 0,30 bis 0,50 Euro je Personenkilometer einen merkbaren Rückgang der privaten Pkw-Nutzung, ein häufig genannter Effekt neuartiger Sharingangebote. (KUHNIMHOF UND EISENMANN (2021))

2.2.4 Weitere Kenngrößen und Zeitwertsätze

Komfort, die Einstellung der Personen zu fahrerlosen Fahrzeugen und weitere, oftmals nicht quantifizierbare Kenngrößen von Verkehrsmittelalternativen gehören nicht zu den typischerweise in Verkehrsnachfragemodellen explizit abgebildeten Kenngrößen. Ihr mittlerer Einfluss geht stattdessen unter anderem in Form der alternativenspezifischen Konstanten in die als Grundlage zur Entscheidungsabbildung der Verkehrsteilnehmenden dienenden Nutzenfunktionen ein (vgl. Kapitel 2.1.2).

Eine oftmals verwendete Kenngröße, die diese nicht beobachteten Einflüsse auf die Moduswahl zumindest in Teilen widerspiegelt, sind Zeitwertsätze. Es handelt sich hierbei nicht direkt um eine Kenngröße des Angebots, da auch Eigenschaften und Einstellungen der Verkehrsteilnehmenden selbst diese Kenngröße beeinflussen. Als Quotient aus Gewichtungparameter für Kosten und Gewichtungparameter für beispielsweise Fahrtzeit einer Nutzenfunktion geben diese Werte an, wie viel eine Zeitersparnis einer Person monetär wert ist. Je höher der Wert, desto negativer wird die damit verbundene Zeitkomponente wahrgenommen. Die Ermittlung von Zeitwertsätzen steht nicht im Fokus dieser Arbeit, daher sei an dieser Stelle auf die Dissertation von KOLAROVA (2021) verwiesen. KOLAROVA (2021) untersucht Zeitwertsätze vollautomatisierter Fahrzeuge in verschiedenen Angebotsformen. Die Zeitwertsätze einer von KOLAROVA (2021) durchgeführten Studie liegen für fahrerlose Sharingangebote in der gleichen Größenordnung wie Fahrten mit konventionellen Pkw mit dem Fahrtziel Arbeit und höher als die für Fahrtzeit in einem Fahrzeug des öffentlichen Verkehrs. Insbesondere im öffentlichen Verkehr dürfen bei der Interpretation dieser Werte jedoch auch die zusätzlichen Reisezeitanteile wie Wartezeiten etc. nicht außer Acht gelassen werden. Für Ridesharing liegen die Zeitwertsätze etwas höher als für Carsharing, die Fahrtzeit in Carsharingfahrzeugen wird somit im Schnitt als angenehmer empfunden (KOLAROVA (2021)).

Für einen Überblick zu Studien, die mittels Stated Preference oder Stated Choice Erhebungen Einflussfaktoren zur Wahl von vollautomatisierten privaten Pkw, Carsharing und Ridesharing identifiziert haben, sei auf GKARTZONIKAS UND GKRTZA (2019) verwiesen.

2.3 Sharingangebote in Verkehrsnachfragemodellen

Es existiert eine Vielzahl von Ansätzen zur Modellierung einzelner Aspekte von Sharingangeboten wie beispielsweise Bündelung und Umlaufbildung. Die Anzahl von Modellierungsansätzen, die auch die Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage und Rückkopplungen zwischen Angebot und Nachfrage erfassen, ist jedoch begrenzt. Nahezu alle dieser Ansätze sind mikroskopisch. Die Literaturlauswertungen von NARAYANAN ET AL. (2020), SOTEROPOULOS ET AL. (2019) und VOSOOGHI (2019), die sich jeweils mit der Modellierung von vollautomatisierten Sharingangeboten befassen, kommen zu dem gleichen Schluss.

Beispiele für mikroskopische Ansätze, die Sharingangebote in Verkehrsnachfragemodelle integrieren, bieten AZEVEDO ET AL. (2016) für SimMobility, BISCHOFF ET AL. (2017) und HÖRL (2017) für MATSim, WILKES ET AL. (2021) und KAGERBAUER ET AL. (2021) für mobiTopp sowie WEN ET AL. (2018) für eine nicht näher benannte Simulationsplattform. Darüber hinaus sei auf die ausführlichen Literaturlauswertungen von NARAYANAN ET AL. (2020), SOTEROPOULOS ET AL. (2019), VOSOOGHI (2019), PERNESTÅL UND KRISTOFFERSSON (2019) und JING ET AL. (2020) verwiesen. NARAYANAN ET AL. (2020), SOTEROPOULOS ET AL. (2019) und PERNESTÅL UND KRISTOFFERSSON (2019) geben jeweils mit leicht unterschiedlich gesetztem Schwerpunkt einen Überblick zu modellbasierten Analysen zum Thema vollautomatisierter Sharingangebote. JING ET AL. (2020) geben einen Überblick über mikroskopische Modelle, die vollautomatisierte Fahrzeuge und Sharingangebote implementieren. VOSOOGHI (2019) unterscheidet mit Nachfrageberechnung, Verkehrsflussmodellierung und Flottenmanagement drei Hauptziele der Modellierung von Sharingangeboten und bietet einen Überblick über Ansätze, die mindestens zwei dieser drei Aspekte berücksichtigen. Zudem gibt VOSOOGHI (2019) einen Überblick über mikroskopische Ansätze zur Sharingmodellierung, die diskrete Wahlmodelle als Grundlage für Entscheidungen der Verkehrsteilnehmenden nutzen. Erste Erkenntnisse bezüglich der entstehenden Abweichungen der Modellergebnisse in der Ridesharingmodellierung unter Verwendung verschiedener mikroskopischer Ansätze bieten KAGHO ET AL. (2022) und ZWICK ET AL. (2022).

Makroskopische Ansätze zur Integration von Sharingangeboten in Verkehrsnachfragemodelle abseits der in dieser Arbeit vorgestellten Methode sind in der Literatur bisher rar und berücksichtigen zentrale Eigenschaften der Sharingangebote oftmals nicht. ZHAO UND KOCKELMAN (2018) integrieren ein vollautomatisiertes Carsharingangebot in ein makroskopisches Vier-Stufen-Modell, berücksichtigen jedoch keine Leerfahrten der Carsharingfahrzeuge. Ähnliches trifft auf die Modellansätze von DIAS ET AL. (2020) und TAJADDINI UND VU (2022) zu, wobei der Fokus hier noch stärker auf privat genutzten vollautomatisierten Fahrzeugen liegt. YIN ET AL. (2017), die Effekte eines erhöhten Besetzungsgrads in Pkw untersuchen, und TROMMER ET AL. (2016), die Effekte vollautomatisierter Sharingangebote in einem nicht-räumlichen Verkehrsnachfragemodell berechnen, berücksichtigen ebenfalls keine Umlaufbildung der Fahrzeuge. LAU UND SUSILAWATI (2021) befassen sich mit der makroskopischen Modellierung eines Ridesharing-

Zubringerangebots, jedoch wird ein fester Linienweg für das Sharingangebot angenommen und es werden weder Last- noch Leerfahrkilometer der Ridesharingfahrzeuge berücksichtigt.

Unabhängig von der Modellierungsart merken NARAYANAN ET AL. (2020) und PERNESTÅL UND KRISTOFFERSSON (2019) an, dass untersuchte Studien zwar empfehlen, Sharingangebote in den öffentlichen Verkehr zu integrieren, entsprechende Untersuchungen zu Wirkungen bisher jedoch kaum zu finden sind. SOTEROPOULOS ET AL. (2019) und PERNESTÅL UND KRISTOFFERSSON (2019) weisen darauf hin, dass die zugrundeliegende Siedlungsstruktur einen wichtigen Einflussfaktor darstellt. ZWICK ET AL. (2021) beispielsweise erhalten bei Modellrechnungen zu sechs verschiedenen geprägten Stadtteilen einen logarithmischen Zusammenhang zwischen mittlerem Ridesharing-Besetzungsgrad und räumlicher Dichte der Personennachfrage. Studien, die den ländlichen Raum abdecken, sind jedoch selten (SOTEROPOULOS ET AL. (2019), PERNESTÅL UND KRISTOFFERSSON (2019)).

In der Literatur überwiegt die Einschätzung, dass makroskopische Verkehrsnachfragemodelle wenig oder zumindest weit weniger gut als mikroskopische Ansätze geeignet sind, um Sharingangebote zu modellieren (NARAYANAN ET AL. (2020), VOSOOGHI (2019), ZHAO UND KOCKELMAN (2018)). Zugleich wird angemerkt, dass makroskopische Verkehrsnachfragemodelle in der Praxis weiter verbreitet sind als mikroskopische Modelle und mikroskopische Ansätze in diesen Modellen nicht angewendet werden können (NARAYANAN ET AL. (2020), VOSOOGHI (2019), DIAS ET AL. (2020)). NARAYANAN ET AL. (2020) kommen daher zu dem Schluss, dass es nötig ist, Schnittstellen zu schaffen, um die beiden Modellierungsarten miteinander zu verknüpfen. VOSOOGHI (2019) schlussfolgert, dass es bei Bedarf notwendig ist, ein mikroskopisches Verkehrsnachfragemodell aufzubauen, um Sharingangebote zu untersuchen. Ansatz dieser Arbeit ist es, eine Methodik vorzustellen, die es ermöglicht makroskopische Verkehrsnachfragemodelle um Sharingangebote zu erweitern.

2.4 Zusammenfassung und Abgrenzung der Arbeit

In diesem Kapitel wurden Grundlagen der Verkehrsnachfragemodellierung und Eigenschaften von Sharingangeboten erläutert, die eine Hinführung zum Inhalt dieser Arbeit bilden.

Diskrete Wahlmodelle bilden die Grundlage von Verkehrsnachfragemodellen. Mithilfe von Parameterschätzungen können mit ihnen die Entscheidungen von Verkehrsteilnehmenden in Form von Wahrscheinlichkeiten wiedergegeben werden. Die klare Struktur des Vier-Stufen-Algorithmus bietet mit den Stufen Verkehrserzeugung, Zielwahl, Moduswahl und Routenwahl, die in Rückkopplung mit Kenngrößen der auslastungsabhängigen Angebotsqualität stehen, einen guten Referenzrahmen für Erklärungen zu Methoden der Verkehrsnachfragemodellierung. Eine zur Abgrenzung dieser Arbeit besonders relevante Unterscheidung ist die in mikroskopische und makroskopische Verkehrsnach-

fragemodelle. Mikroskopische Modelle bilden diskrete Entscheidungen einzelner Personen (Agenten) ab. Es wird ein auf Grundlage von Wahrscheinlichkeitsverteilungen zufällig gewählter, spezifischer Tag abgebildet, wobei Nachfragewerte stets ganzzahlig sind. Makroskopische Verkehrsnachfragemodelle bilden Entscheidungen aggregiert als Erwartungswerte der Wahrscheinlichkeitsberechnungen ab. Es wird die Nachfrage eines durchschnittlichen, wiederkehrenden Tags abgebildet. Nachfragewerte gehören daher den reellen Zahlen an.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Angebotsformen betrachtet, die mittels geteilter Fahrzeugflotten betrieben werden. Das Fahrtenangebot richtet sich nach der Nachfrage. Es wird unterschieden in Carsharing (Teilen eines Fahrzeugs durch voneinander unabhängige Personen nacheinander) und Ridesharing (Teilen eines Fahrzeugs durch voneinander unabhängige Personen auch gleichzeitig in einer Fahrzeugfahrt). Für beide Sharingangebotsformen wird davon ausgegangen, dass Leerfahrten genutzt werden, um Fahrgäste an einem ihnen nahegelegenen Ort abzuholen. Leerfahrten werden im Rahmen einer Fahrzeug-Umlaufbildung generiert. Das ridesharingspezifische Zusammenfassen voneinander unabhängiger Fahrtwünsche in Fahrzeugfahrten findet im Schritt der Bündelung statt.

Sharingangebote können direkt und damit als einziges Verkehrsmittel eines Weges genutzt werden oder als Zubringer zu fahrplangebundenen Verkehrsmitteln des öffentlichen Verkehrs. Und Sharingfahrten können als Teil des ÖV oder in Konkurrenz dazu angeboten werden. Jede dieser Angebotsausprägungen findet in der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Modellierungsmethodik Berücksichtigung. Insbesondere Methoden zur Integration von Ridesharing in den öffentlichen Verkehr in Verkehrsnachfragemodellen sind in der Literatur bisher wenig vertreten. Der Anwendungsfall der vorgestellten Methodik, der Ridesharing in den öffentlichen Verkehr eines peri-urbanen Raums integriert, demonstriert somit nicht nur deren praktische Anwendbarkeit, sondern kann inhaltlich noch nicht extensiv betrachtete Aspekte beleuchten.

Die Automatisierung der Fahrzeuge und damit die Fähigkeit fahrerlos zu fahren steht nicht im Vordergrund dieser Arbeit, da die grundsätzliche Modellierungsweise der Sharingangebote nicht unmittelbar von deren Automatisierungsgrad beeinflusst wird. Dennoch werden die vorangehend beschriebenen Angebotsausprägungen in flächendeckendem Angebot überwiegend bei fahrerlosem Betrieb in Betracht gezogen, da von einer Kostensenkung durch Wegfall des Fahrpersonals ausgegangen wird.

Die Literaturlauswertung zu verwandten Arbeiten zeigt, dass bisher nahezu alle Ansätze zur Integration von Sharingangeboten in Verkehrsnachfragemodelle mikroskopische Ansätze sind. Dennoch besteht Bedarf, auch für bestehende makroskopische Modelle Möglichkeiten zu schaffen, Sharingangebote abzubilden. Der Aufbau insbesondere mikroskopischer Verkehrsnachfragemodelle ist daten- und arbeitsintensiv. Zudem besitzen viele Regionen und Gemeinden bereits makroskopische Verkehrsnachfragemodelle, die ihnen vertraut sind, wodurch die Ergebnisinterpretation verbessert wird. Mikroskopische Ansätze können aufgrund der abweichenden Nachfrageinterpretation nicht ohne Weiteres in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle übertragen werden. Das gilt

insbesondere für die sharingspezifischen Schritte der Fahrtenbündelung und Umlaufbildung. Diese Arbeit stellt in den folgenden Kapiteln Modellierungsmethoden vor, um Sharingangebote makroskopisch abzubilden und in bestehende Modelle zu integrieren. Dabei können ganzzahlige oder auch nicht-ganzzahlige Nachfragewerte verarbeitet werden.

Die vorgestellten Modellierungsmethoden eignen sich grundsätzlich nicht nur für Pkw-Sharingangebote, sondern können ebenso für beispielsweise Fahrrad- oder Rollerverleihsysteme angepasst werden. Insgesamt lässt sich sagen, dass Modellierungsmethoden, die die Abbildung von Ridesharing ermöglichen, auch dazu geeignet sind, Carsharing abzubilden. Es entfällt der Schritt der Fahrtenbündelung. Im Zweifelsfall wird daher im Rahmen der folgenden Kapitel auf Ridesharing eingegangen, da dies den komplexeren Anwendungsfall darstellt.

3 Erweiterung der Modellstruktur und Anwendung im Beispielmodell

Um Sharingangebote in bestehende Verkehrsnachfragemodelle zu integrieren, muss der klassische Vier-Stufen-Algorithmus zur Berechnung der Verkehrsnachfrage (Abbildung 1, S. 31, ergänzt um Abfahrtszeitwahl) erweitert und angepasst werden (Kapitel 3.1). Dadurch sind auch Anpassungen des Angebotsmodells und der Abbildung der Siedlungsstrukturen des bestehenden Verkehrsnachfragemodells erforderlich. In den Kapiteln 3.2 und 3.3 wird die Umsetzung der vorangehend genannten Anpassungen im makroskopischen Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart erläutert. Das Anwendungsbeispiel wird in folgenden Kapiteln wiederholt aufgegriffen. In Kapitel 7 folgt die Auswertung von in diesem Verkehrsnachfragemodell berechneten Ridesharingsszenarien.

3.1 Erweiterte Modellstruktur

Abbildung 3 veranschaulicht die im Folgenden beschriebene Erweiterung und Anpassung der Modellstruktur zur Integration von Sharingangeboten.

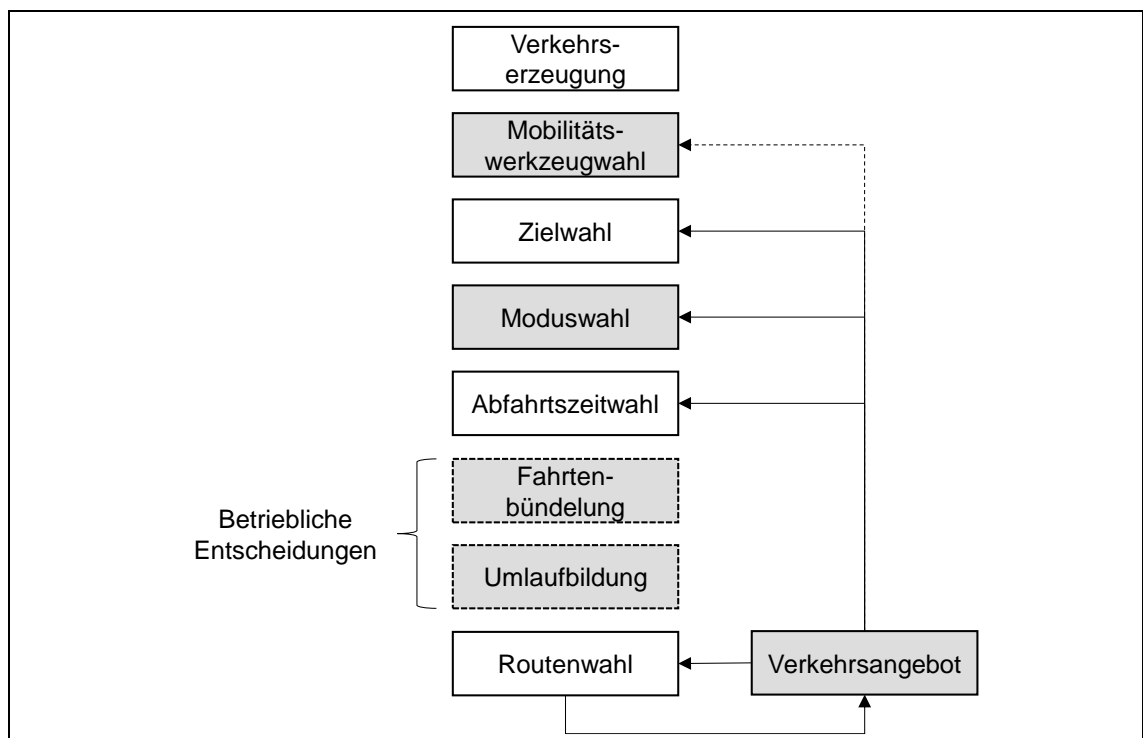


Abbildung 3: Erweiterung und Anpassung der Modellstruktur (vgl. Abbildung 1, S. 31) zur Integration von Sharingangeboten (grau hinterlegt).

Die Erweiterung des Vier-Stufen-Algorithmus erfolgt primär um die Abbildung der betrieblichen Entscheidungsprozesse, die in die beiden Teilschritte Bündelung von

Personenfahrten in Fahrzeuglastfahrten (Ridesharing) und Umlaufbildung (Ridesharing und Carsharing) unterteilt werden können. Mit Integration der betrieblichen Entscheidungsprozesse in den Berechnungsablauf wird nunmehr nicht nur die Qualität des Verkehrsangebots, sondern dessen grundlegende Struktur im Sinne räumlicher und zeitlicher Verfügbarkeit des Verkehrsangebots durch die Personennachfrage beeinflusst. Da Sharingfahrzeuge Einfluss auf auslastungsabhängige Fahrtzeiten im Straßenverkehr haben, sollten die genannten Schritte möglichst in den Rückkopplungsprozess zwischen Angebot und Nachfrage eingebunden werden. Zudem können so auch nachfrageabhängige Angebotseigenschaften des Ridesharing, z.B. der mittlere Umwegfaktor geteilter Fahrzeugfahrten, in der Moduswahl berücksichtigt werden.

Mit einer angenommen flächendeckenden Verfügbarkeit von Sharingangeboten tritt zudem die Mobilitätswerkzeugwahl der Verkehrsteilnehmenden wie die der Verfügbarkeit einer ÖV-Zeitkarte oder eines Pkw in den Fokus. HÖRL ET AL. (2019) ermitteln in ihrer Erhebung in der Schweiz beispielsweise, dass der Pkw-Besitz je Haushalt von 1,37 auf 0,95 Pkw sinkt, wenn vollautomatisierte Sharingangebote zur Verfügung stehen. Sobald die Umfrageteilnehmenden vollautomatisierte Fahrzeuge jedoch auch privat erwerben können, bleibt der Pkw-Besitz nahezu unverändert (HÖRL ET AL. (2019)). MARTIN ET AL. (2010) zeigen in ihrer Studie unter Nutzenden aktueller Carsharingangebote in Nordamerika einen signifikanten Rückgang der Anzahl der Fahrzeuge je Haushalt von 0,47 auf 0,24 Pkw. CZARNETZKI UND SIEK (2021) erkennen einen ähnlichen Zusammenhang in Hamburg. MENON ET AL. (2019) identifizieren in ihrer Studie in den USA, welche personenspezifischen Eigenschaften Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit haben, ob ein privater Pkw auf Grund von vollautomatisierten Sharingangeboten aufgegeben wird. In vielen Verkehrsnachfragemodellen wird die Mobilitätswerkzeugwahl bisher jedoch nicht modelliert, sondern anhand externer Prognosen des Motorisierungsgrads vorgegeben (EVNM-PV (FGSV (2022))). Um einen möglichen Trendbruch durch eine hohe Verfügbarkeit von Sharingangeboten und dessen Einfluss auf die Ziel- und Moduswahl gut abbilden zu können, sollte auch die Mobilitätswerkzeugwahl in der Verkehrsnachfrageberechnung berücksichtigt werden. Da die Mobilitätswerkzeugwahl eine langfristige Entscheidung als beispielsweise Ziel- und Moduswahl ist, wird sie in Abbildung 3 bei der Verkehrserzeugung angeordnet. Der Schritt der Mobilitätswerkzeugwahl ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Neben der Erweiterung der Verkehrsnachfrageberechnung um neue Schritte, erfordert die Integration von Sharingangeboten außerdem die Anpassung bereits vorhandener Schritte. Anzupassen ist zum einen die Moduswahl und, in Abhängigkeit davon, ob das Sharingangebot in den ÖV integriert wird oder nicht, die eng mit der Routen- und Verbindungswahl verknüpfte Verkehrsmittelwahl im ÖV. Zudem müssen die neuen Verkehrsmittel in das bestehende Angebotsmodell integriert werden.

3.2 Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart als Beispielanwendung

Um die Praktikabilität der in dieser Arbeit untersuchten Methoden zur Integration von Sharingangeboten in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle zu prüfen und darüber hinaus planerische Aussagen treffen zu können, wird das makroskopische Verkehrsnachfragemodell des Verbands Region Stuttgart (VRS-Modell) als Anwendungsfall verwendet. Das von RITZ (2019) ausführlich dokumentierte Modell bildet die Verkehrsnachfrage der Einwohner der Region Stuttgart sowie deren Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehr an einem durchschnittlichen Werktag ab. Aufbauend auf dem Analysejahr 2010 wurde das Modell für das Bezugsjahr 2025 sowie 2030 fortgeschrieben. Für diese Arbeit wird das für das Jahr 2030 fortgeschriebene Modell entsprechend TRITSCHLER UND BIECHELE (2020) genutzt.

Räumlich ist das Modell in insgesamt 1.306 Verkehrszellen unterteilt. Auf Ebene der Verkehrszellen werden Strukturgrößen für Aktivitätenorte sowie personengruppenspezifische Einwohnerzahlen vorgehalten. Auf Grundlage dieser verkehrszellenspezifischen Informationen wird die Verkehrsnachfrage berechnet. Dabei werden 23 verhaltenshomogene Personengruppen und 19 Wegezwecke (Aktivitäten), die zu Aktivitätenketten kombiniert werden, unterschieden. In den Personengruppen ist festgehalten, ob ein Pkw zur Verfügung steht oder nicht.

Die Verkehrsnachfrageberechnung erfolgt in den Schritten Verkehrserzeugung, Zielwahl, Moduswahl und Routenwahl. In der Moduswahl werden die Modi Pkw-Selbstfahrend (d.h. als fahrende Person), Pkw-Mitfahrend, ÖV-Monatsticket, ÖV-Einzelticket, Park and Ride, Rad und Fuß unterschieden. Zielwahl und Moduswahl werden simultan berechnet und es findet eine Rückkopplung zwischen Routenwahl und simultaner Ziel- und Moduswahl statt. Dadurch werden die mittels Capacity-Restraint-Funktionen berechneten Nutzenänderungen des Pkw-Angebots berücksichtigt. Die simultane Ziel- und Moduswahl ermöglicht eine stundenfeine Berechnung der Verkehrsnachfrage auf Grundlage aktivitätenpaarspezifischer Nachfrageganglinien. Im motorisierten Individualverkehr wird zur Umlegung der Fahrzeugfahrten eine Gleichgewichtsumlegung genutzt, die die Tagesnachfrage je Verkehrssystem auf das Streckennetz legt. Im ÖV wird eine fahrplanbasierte Umlegung unter Berücksichtigung der Abfahrtszeitwahl genutzt. Hier wird die Nachfrage in drei Zeitintervalle unterteilt (morgendliche Hauptverkehrszeit, abendliche Hauptverkehrszeit und Nebenverkehrszeit).

3.3 Grundlegende Erweiterung und Anpassung des Beispielmodells

Im Rahmen des Projekts, das dem Anwendungsfall zugrunde liegt, wird die Integration eines Ridesharingangebots in den ÖV in einem peri-urbanen Gebiet östlich Stuttgarts untersucht (Projektbericht siehe RICHTER ET AL. (2021)). Der Planungsraum der Untersuchung erstreckt sich somit über das peri-urbane Gebiet „Schurwald“. Den

Untersuchungsraum bildet die Region Stuttgart, deren Verkehrsnachfrage durch das VRS-Modell abgebildet wird. Abbildung 4 zeigt Untersuchungs- und Planungsraum im Modell.

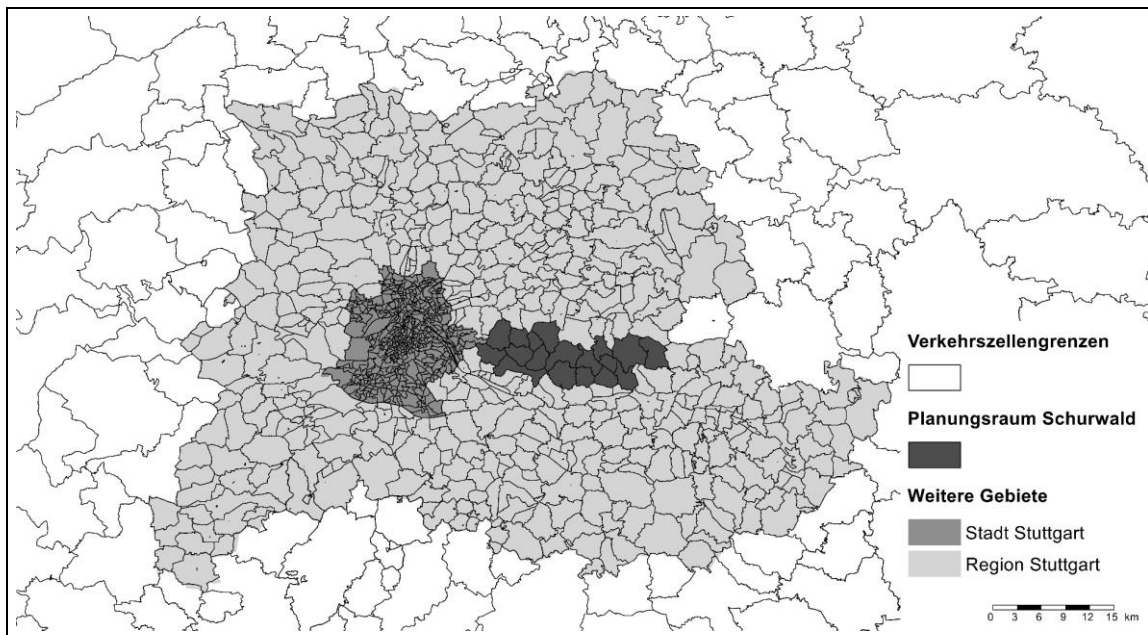


Abbildung 4: Untersuchungsraum Region Stuttgart und Planungsraum Schurwald im VRS-Modell.

In den Kapiteln 4 bis 6 dieser Arbeit wird vertieft auf methodische Aspekte der Erweiterung eines Verkehrsnachfragemodells eingegangen und in Kapitel 7 auf die Inhalte und Ergebnisse des Anwendungsfalls. Im Folgenden werden kurz die grundlegenden zur Integration von Ridesharing vorgenommenen Anpassungen des VRS-Modells beleuchtet.

In Bezug auf die Verkehrsnachfrageberechnung wird der vorhandene Berechnungsablauf um Schritte für Fahrtenbündelung und Umlaufbildung der Ridesharingfahrzeuge erweitert. Da das zu integrierende Ridesharingangebot nicht in Konkurrenz, sondern als Teil des ÖV angeboten wird, erfolgt, vereinfachend, keine Anpassung der Moduswahl. Stattdessen wird Ridesharing in die ÖV-Verkehrsmittelwahl integriert und die Berechnung der in der Moduswahl in den ÖV-spezifischen Nutzenfunktionen verwendeten Kenngrößen angepasst. Ein Mobilitätswerkzeugwahlmodell wird nicht implementiert, sodass möglicherweise durch Ridesharing erzeugte Veränderungen in der personengruppenbezogenen Pkw-Verfügbarkeit nicht abgebildet werden.

Um die Systemeigenschaften von Ridesharingangeboten, insbesondere die Bündelung von Personenfahrten und die daraus resultierenden Umwege sowie die Umlaufbildung, detailliert abbilden zu können, wird das Modell im Planungsraum sowohl räumlich als auch zeitlich feiner differenziert. Die zeitliche Disaggregation der ÖV-Nachfrage (inklusive Ridesharingnachfrage) wird mittels der im VRS-Modell hinterlegten stundenfeinen Nachfrageganglinien in der simultanen Ziel- und Moduswahl realisiert. Um 15-Minutenfeine Nachfragematrizen zu erhalten, wird von einer Gleichverteilung der Nachfrage

innerhalb einer Stunde ausgegangen. Somit wird die ÖV-Tagesnachfrage nun in 96 statt zuvor drei Zeitintervallen berechnet.

Räumlich wird die Nachfrage im Planungsraum feiner differenziert, indem die maximale Verkehrszellengröße auf 300 Meter mal 300 Meter festgelegt wird. So erhöht sich die Verkehrszellenzahl von 18 auf 301 Verkehrszellen im Planungsraum (Abbildung 5). Als Grundlage zur feineren Aufrasterung der Verkehrszellen dient das 100 Meter mal 100 Meter Rasterzellennetz des Mikrozensus 2011 inklusive Einwohnerzählungen (STATISTISCHES BUNDESAMT (2011)). Mittels Gewichtung anhand der Einwohnerzählungen und im VRS-Modell als Points of Interest hinterlegten Informationen zu Schulen, Einkaufsmöglichkeiten, Arbeitsplätzen und Weiterem werden die Strukturgrößen und die Siedlungsstruktur entsprechend den feineren Verkehrszellen disaggregiert. Darüber hinaus müssen die Anbindungen von Verkehrszellenschwerpunkten zu Zugangspunkten im Streckennetz neu erstellt werden. Sie bilden zu Fuß zurückgelegte Zu- und Abgangswege zu Pkw und ÖV-Verkehrsmitteln ab. Das Vorgehen zur Disaggregation der Verkehrszellen wird im Detail von SEELHORST (2020) beschrieben.

Das so in Bezug auf die Nachfrage räumlich und zeitlich feiner differenzierte VRS-Modell stellt den Basisfall für die in Kapitel 7 erläuterten Szenarienberechnungen dar.

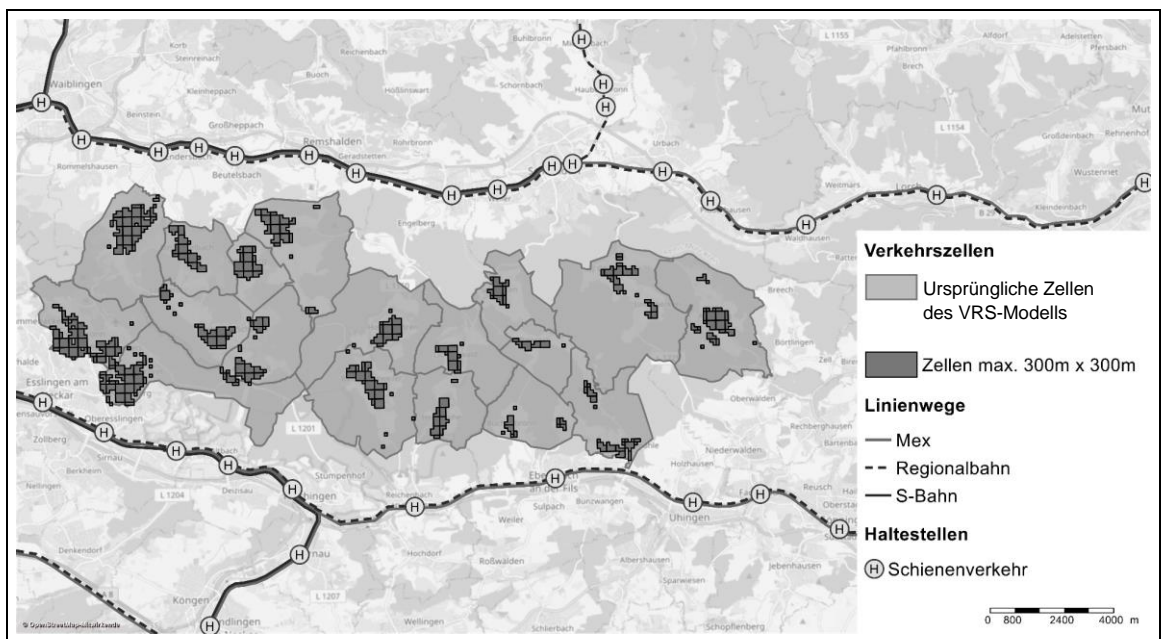


Abbildung 5: Räumliche Disaggregation des Planungsraums Schurwald (nach RICHTER ET AL. (2021)).

4 Abbildung betrieblicher Entscheidungsprozesse

Im Vergleich zu den weiteren in Kapitel 3 vorgestellten notwendigen Anpassungen des traditionellen Vier-Stufen-Algorithmus zur Integration von Sharingangeboten, wie Ride-sharing und Carsharing, stellen die im Folgenden behandelten Schritte einen Sonderfall dar. Im Gegensatz zu den traditionell im Vier-Stufen-Algorithmus abgebildeten Entscheidungen, werden hier nicht die Entscheidungen der Verkehrsteilnehmenden, sondern kurzfristige betriebliche Entscheidungen abgebildet. Langfristige betriebliche Entscheidungen wie beispielsweise die Festlegung eines Bedienegebiets oder das Tarifsystem können innerhalb von Szenarienrechnungen als konstant angenommen und entsprechend als Eingangsgröße in der Angebotsmodellierung berücksichtigt werden. Kurzfristige und vor allem nachfrageabhängige betriebliche Entscheidungen jedoch stellen eine Besonderheit für die Verkehrsnachfragemodellierung dar. Diese betrieblichen Entscheidungen lassen sich in zwei Schritte, die ridesharingsspezifische Bündelung von Personenfahrten und die Umlaufbildung, untergliedern. Ziel dieser Schritte ist es, die in Abhängigkeit der Personennachfrage generierten Last- und Leerfahrten der Fahrzeugflotte zu bestimmen.

Im Folgenden wird auf die Anforderungen an die Modellierungsmethode (Kapitel 4.1) eingegangen, anschließend die Fahrtenbündelung näher untersucht (Kapitel 4.2) und je ein Ansatz zur Umlaufbildung (Kapitel 4.3) und zum Runden von Nachfrage (Kapitel 4.4) vorgestellt. Die beschriebenen Methoden werden in Kapitel 4.5 im angepassten Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart angewendet.

4.1 Anforderungen an die Modellierungsmethode

Traditionelle Verkehrsnachfragemodelle erfassen Auswirkungen der Nachfrage auf das Angebot beispielsweise mittels Capacity-Restraint-Funktionen. So können unter anderem auslastungsabhängige Fahrtzeiten im Pkw-Verkehr und damit Änderungen der Angebotsqualität in Abhängigkeit zur Nachfrage abgebildet werden. Die räumliche und zeitliche Struktur des Angebots, wie beispielsweise das Straßennetz oder Linienvläufe und Fahrpläne des ÖV, bleibt jedoch unverändert. Im Gegensatz dazu muss bei Sharingangeboten diese Struktur an die Nachfrage angepasst werden. Folglich wird der Vier-Stufen-Algorithmus um Schritte zur Festlegung des Sharingangebots erweitert; die Struktur und Verfügbarkeit des Sharingangebots wird als Antwort auf die Nachfrage der Verkehrsteilnehmenden festgelegt. Die kurzfristigen Entscheidungen der das Angebot bereitstellenden Betreiber können in die Fahrtenbündelung und die Umlaufbildung der Fahrzeuge unterteilt werden:

- Im Schritt der Fahrtenbündelung werden voneinander unabhängige Personenfahrten zu Fahrzeuglastfahrten zusammengefasst. Damit ist der Schritt der Fahrtenbündelung nur für Ridesharingangebote relevant. Bei Carsharingangeboten entsprechen die unabhängigen Personenfahrten direkt den benötigten Fahrzeuglastfahrten.

- In der Umlaufbildung werden die Lastfahrten der Sharingfahrzeuge zu Fahrzeugumläufen verkettet, wodurch sich Leerfahrten und die benötigte Flottengröße ergeben.

In Verkehrsnachfragemodellen verwendete Berechnungsansätze zur Abbildung dieser kurzfristigen Entscheidungsprozesse lassen sich in zwei Kategorien unterteilen, die wiederum einem makroskopischen oder mikroskopischen Modellierungsansatz zugeordnet werden können.

In mikroskopischen, agentenbasierten Verkehrsnachfragemodellen kommen entsprechend deren chronologischer Funktionsweise dynamische Ansätze zur Anwendung. Zu Beginn des untersuchten Zeitraums sind noch nicht alle Fahrtwünsche bekannt. Stattdessen gehen die Anfragen im Laufe der Zeit ein und werden nach einem definierten Schema chronologisch abgearbeitet. Für Beispiele zu Sharingangeboten in mikroskopischen Verkehrsnachfragemodellen siehe Kapitel 2.3.

Die Modellierung von Sharingangeboten entsprechend PTV GROUP (2020) zeigt, dass mikroskopische Ansätze auch mit einer makroskopischen Verkehrsnachfrageberechnung kombiniert werden können. Dazu werden die makroskopischen Nachfragedaten disaggregiert und diskretisiert, um als Eingangsgrößen für die mikroskopische Bündelung und Umlaufbildung dienen zu können. Im Umkehrschluss ist es nötig, mehrfache Läufe der mikroskopischen Berechnungsschritte auszuführen, um belastbare Ergebnisse zu erhalten (PTV GROUP (2020)).

Die grundlegenden Eigenschaften eines makroskopischen Ansatzes zur Modellierung von Bündelung und Umlaufbildung leiten sich direkt aus den Eigenschaften makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle ab. Einzelne mikroskopische Simulationsläufe repräsentieren jeweils die Nachfrage eines (beliebigen und zufällig gewählten) spezifischen Tages. Makroskopische Modelle hingegen zielen darauf ab, die Nachfragesituation eines wiederkehrenden durchschnittlichen Tages zu erfassen und als Grundlage für planerische Entscheidungen zur Verfügung zu stellen. Da auch Betreiber aus wiederkehrenden Nachfragesituationen lernen und die Fahrzeugdistribution entsprechend anpassen werden, scheint es angebracht davon auszugehen, dass bereits zu Beginn von Bündelungs- und Umlaufbildungsschritt alle Informationen zur erwarteten Personennachfrage zur Verfügung stehen. Damit ist das zu lösende Bündelungs- und Umlaufbildungsproblem als statisch zu klassifizieren. Zur näheren Erläuterung statischer und dynamischer Flottenmanagementprobleme sowie weiterer Klassifizierungsmöglichkeiten siehe HYLAND UND MAHMASSANI (2017).

In Verkehrsnachfragemodelle integrierte makroskopische und mikroskopische Ansätze tendieren auf Grund ihrer unterschiedlichen Modellierungsphilosophien dazu, unterschiedliche Fragestellungen zu untersuchen: Mikroskopische Ansätze beantworten eher die Frage, bis zu welchem Grad eine gegebene Fahrzeugflotte die berechnete Nachfrage bedienen kann (siehe beispielsweise MARCZUK ET AL. (2015) oder BISCHOFF ET AL. (2017)). Im Makroskopischen hingegen wird eher der umgekehrte Ansatz verfolgt und die erforderliche Flottengröße für das vollständige Bedienen der berechneten Nachfrage ermittelt. Dennoch ist es wichtig, darauf hinzuweisen, dass es trotz dieser

Tendenzen möglich ist, beide Modelltypen in umgekehrter Weise zu verwenden. BOESCH ET AL. (2016), WANG ET AL. (2018) oder FAGNANT UND KOCKELMAN (2018) beispielsweise bestätigen dies, indem sie mikroskopische Ansätze zur Berechnung der benötigten Anzahl von Fahrzeugen anwenden.

Tabelle 5 zeigt eine Übersicht typischer Eingangs- und Ausgangsdaten der Bündelung und Umlaufbildung.

Eingangsdaten	Verarbeitung	Ergebnis und Kenngrößen
Variable Größen: <ul style="list-style-type: none"> • Räumlich und zeitlich differenzierte Personennachfrage • Fahrzeugfahrzeiten 	Dynamisch (chronologisch) oder Statisch (allwissend)	Ergebnis: <ul style="list-style-type: none"> • Räumlich und zeitlich differenzierte Last- und Leerfahrten
Parameter: <ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeugkapazität • Bündelungsregeln (z.B. max. Umweg) • Umlaufbildungsregeln (z.B. max. Leerfahrtdauer) • Flottengröße oder Servicequalität (z.B. max. Wartezeit) 		Kenngrößen: <ul style="list-style-type: none"> • Last- und Leerfahrtkilometer/-stunden • Besetzungsgrade • Umwegfaktoren • Servicequalität (z.B. mittlere Wartezeit, Anteil nicht bedienter Nachfrage) oder Anzahl benötigter Fahrzeuge

Tabelle 5: Zusammenfassende Übersicht zu typischen Eingangs- und Ausgangsdaten der Bündelung und Umlaufbildung.

Die grundlegende Anforderung, die in Tabelle 5 dargestellten Eingangsdaten zu verarbeiten, Restriktionen einzuhalten und Ergebnisse in einer Form zu erzeugen, die es ermöglicht die generierten Fahrzeugfahrten in die Umlegung zu integrieren, richtet sich sowohl an mikroskopische als auch makroskopische Ansätze. Durch die Umlegung der Fahrzeugfahrten auf das Straßennetz können bei hoher Fahrleistung der Flotte mittels Capacity-Restraint-Funktionen ermittelte Fahrtzeiten im motorisierten Verkehr stark beeinflusst werden. Daher sollten die betrieblichen Entscheidungsprozesse in den Iterationsprozess von Angebot und Nachfrage einbezogen werden. Die Anforderung eines möglichst geringen Rechenaufwands erhält dadurch zusätzliches Gewicht.

Eine weitere und zentrale Anforderung an makroskopische Ansätze zur Bündelung und Umlaufbildung ergibt sich aus der Form der eingehenden Personennachfrage. Entsprechend der makroskopischen Modellierung wird Personennachfrage als Erwartungswert berechnet. Da diese Erwartungswerte der Menge der reellen Zahlen zuzuordnen sind, müssen makroskopische Ansätze auch nicht-ganzzahlige Nachfrage verarbeiten können. Bestehende mikroskopische Ansätze erfüllen diese Anforderung nicht.

Der in dieser Arbeit diskutierte makroskopische Ansatz zur Fahrtenbündelung wird von FRIEDRICH ET AL. (2018) vorgestellt und eine Weiterentwicklung entsprechend RICHTER ET AL. (2019) angewendet. HARTLEB ET AL. (2021) stellen eine dazu komplementäre Heuristik zur Umlaufbildung vor. Die Methoden sind sowohl für ganzzahlige als auch nicht-ganzzahlige Nachfrage anwendbar.

4.2 Fahrtenbündelung

Ziel des Schritts der Fahrtenbündelung ist es, die Fahrtwünsche voneinander unabhängiger Personen zu Fahrzeuglastfahrten zu bündeln. Damit ist dieser Schritt nur für Ridesharingangebote relevant und entfällt bei Carsharing. Im Folgenden wird eine makroskopische Herangehensweise vorgestellt (Kapitel 4.2.1), sowie der Einfluss von maximaler Wartezeit und makroskopischer Betrachtungsweise auf das Bündelungsergebnis näher untersucht (Kapitel 4.2.2 und 4.2.3). Auf Grundlage der untersuchten Einflüsse ergibt sich ein Ansatz für eine alternative Berechnungsmethode im Bündelungsschritt (Kapitel 4.2.4).

4.2.1 Modellierungsmethode

Entsprechend FRIEDRICH ET AL. (2018) und RICHTER ET AL. (2019) wird das folgende Vorgehen zur Bündelung makroskopischer Personennachfrage zu Fahrzeuglastfahrten weiterentwickelt und angewendet:

Als Input des Algorithmus dient neben restriktiven Bedingungen vor allem die zeitintervall- und relationsfeine Ridesharing-Personennachfrage, die Ridesharing-Fahrtwünsche darstellt. Es wird jeweils die Personennachfrage eines Zeitintervalls in möglichst wenig Fahrzeuglastfahrten gebündelt. Zu diesem Zweck wird die Personennachfrage eines Zeitintervalls mit einer Bestwegumlegung auf das Streckennetz umgelegt. Jeder so entstandenen Route wird neben ihrer Personennachfrage eine potenzielle Kapazität zur Mitnahme von Fahrgästen zugewiesen. Diese Kapazität wird im Folgenden Bündelungskapazität genannt. Anschließend werden im Bündelungsschritt die räumlichen Verläufe der Routen miteinander verglichen. Das geschieht nicht auf Strecken- sondern auf Verkehrszellenebene: Die Folge der von einer Route genutzten Strecken wird in eine Folge durchfahrener Verkehrszellen umgeschrieben, wodurch sich ein Korridor ergibt. Zu- und Ausstiege potenziell Mitfahrender sind entlang dieses Korridors möglich. (FRIEDRICH ET AL. (2018))

Abbildung 6 zeigt beispielhaft für drei Routen, wie die Umwandlung von Streckenfolgen in Zellenfolgen erfolgt. Für die weitere Bündelung sind die Zellenfolgen ohne Dopplungen relevant: Die Routen werden ihrer Länge nach sortiert. Die längste Route bestimmt die erste Fahrzeugfahrt und deren bediente Zellenfolge. Liegt die Zellenfolge einer der kürzeren Routen innerhalb der durch die Fahrzeugfahrt bedienten Zellenfolge, wird deren Personennachfrage bei Einhaltung der weiteren Randbedingungen dieser Fahrzeugfahrt zugeordnet. (RICHTER ET AL. (2019))

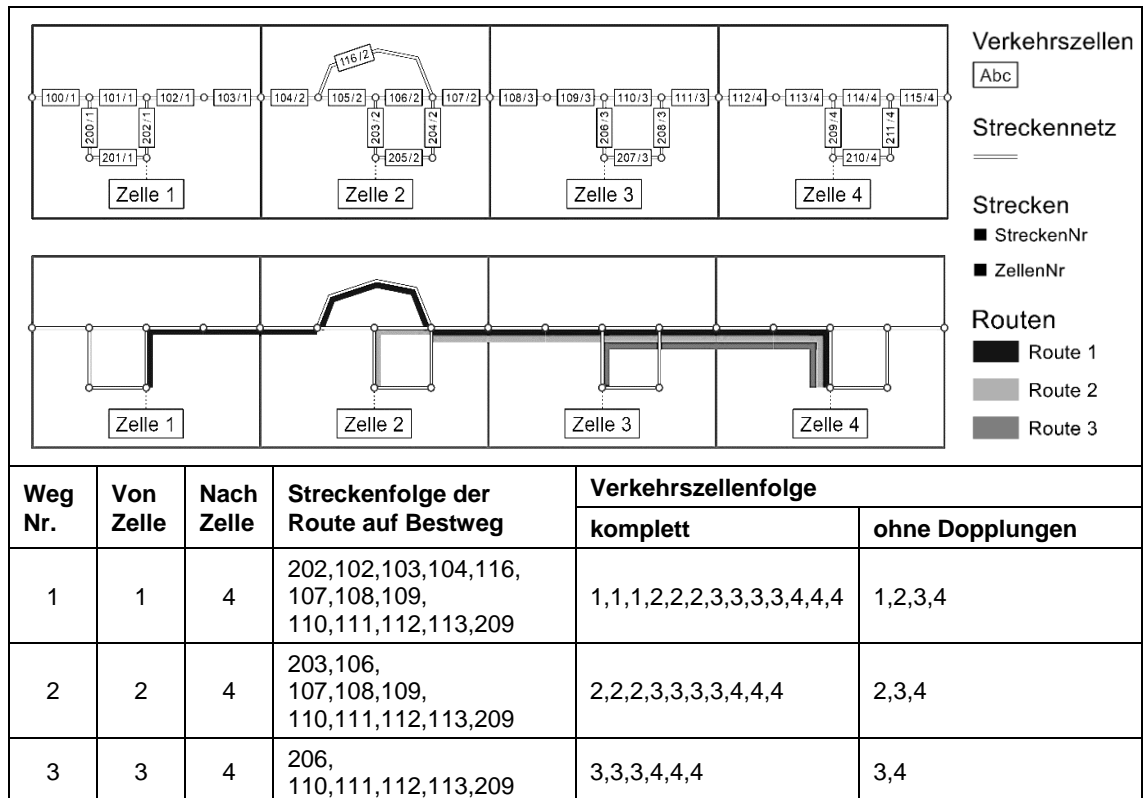


Abbildung 6: Aufbereitung von Routen der Personennachfrage für die Bündelung in Fahrzeuglastfahrten auf Ebene von Verkehrszellen (RICHTER ET AL. (2019)).

Da die Kapazität eines Fahrzeugs und damit auch einer Fahrzeugfahrt begrenzt ist, ist die Bestimmung der Bündelungskapazität einer Route ein zentraler Bestandteil des Bündelungsalgorithmus. Bei ganzzahliger Nachfrage wird dem ersten Fahrgast ein Fahrzeug zugewiesen, die Restkapazität zur Bündelung entspricht dann der Fahrzeugkapazität abzüglich des bereits vergebenen Sitzplatzes. In makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen ist die Nachfrage jedoch nicht ganzzahlig und liegt je Relation und Zeitintervall oftmals unter Eins. Dadurch ist die Festlegung der Bündelungskapazität, der Restkapazität und damit der benötigten Fahrzeuglastfahrten im Makroskopischen weniger intuitiv lösbar als in mikroskopischen, agentenbasierten Modellen. (RICHTER ET AL. (2019))

Die Ausführungen von FRIEDRICH ET AL. (2018) und RICHTER ET AL. (2019) ergänzt die folgende Erläuterung der Kapazitätsbestimmung sowie deren formalisierte Darstellung in Formel (8) und (9). Grundsätzlich gilt:

- Entspricht die Personennachfrage der Fahrzeugkapazität oder einem Vielfachen davon, werden entsprechend viele Fahrzeugfahrten generiert. Es entsteht keine Restkapazität zum Bündeln weiterer Personennachfrage, da es sich um vollbesetzte Fahrzeugfahrten handelt.

Für eventuell verbleibende Personennachfrage werden zwei Fälle unterschieden:

- Die verbleibende Personennachfrage ist kleiner als 1 Personenweg:
Es wird davon ausgegangen, dass die Bündelungskapazität der Route aus ihrer

initialen Personennachfrage abgeleitet werden kann. Eine mögliche Interpretation eines Nachfragewerts von z.B. 0,5 Personenwegen ist, dass im Schnitt alle zwei Tage eine Person auf dieser Relation und in diesem Zeitintervall Ridesharing nutzen will. Da sämtliche Personennachfrage bedient wird, steht alle zwei Tage ein Fahrzeug zur Verfügung. Die routenspezifische Bündelungskapazität des im Modell abgebildeten durchschnittlichen Tags ergibt sich dementsprechend als 0,5 multipliziert mit 1 Fahrzeugfahrt sowie der Fahrzeugkapazität. Sie beträgt in diesem Beispiel somit 0,5-mal die Fahrzeugkapazität.

- Die verbleibende Personennachfrage ist größer gleich 1 Personenweg:
Für Routen, deren Personennachfrage mindestens einen Personenweg beträgt, wird davon ausgegangen, dass täglich mindestens ein Fahrzeug fährt, also auch am modellierten mittleren Tag. Die routenspezifische Bündelungskapazität entspricht somit der Fahrzeugkapazität.

Die Bündelungskapazität einer Route ergibt sich damit wie in Formel (8) und (9) dargestellt in Form einer stetigen abschnittsweise definierten linearen Funktion mit abwechselnd linear steigenden und konstanten Abschnitten. Die Restkapazität zur Bündelung weiterer Personenwege ergibt sich aus der Differenz von Bündelungskapazität und bereits beförderter Nachfrage der Route. Abbildung 7 zeigt den Funktionsverlauf zur Anzahl der benötigten Fahrzeuglastfahrten in Abhängigkeit der Personennachfrage entsprechend Formel (8). Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Funktion zur Vereinfachung „Rampenfunktion“ genannt. Wird entsprechend FRIEDRICH ET AL. (2018) je Quelle-Ziel-Relation der Bestweg zur Ermittlung der Route einer Fahrzeugfahrt herangezogen, dann sind die routenspezifischen Festlegungen in Formel (8) und (9) gleichermaßen relationspezifisch gültig und die routenfeine Unterscheidung kann entfallen.

$$d_{odtr}^{veh,o} = \begin{cases} \left\lceil \frac{d_{odtr}^p}{c^{veh}} \right\rceil + (d_{odtr}^p \bmod c^{veh}) & , \text{ für } (d_{odtr}^p \bmod c^{veh}) < 1 \\ \left\lceil \frac{d_{odtr}^p}{c^{veh}} \right\rceil & , \text{ für } (d_{odtr}^p \bmod c^{veh}) \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$c_{odtr}^{pool} = d_{odtr}^{veh,o} \cdot c^{veh} \quad (9)$$

mit

$d_{odtr}^{veh,o}$ Fahrzeuglastfahrten $d^{veh,o}$ der Relation von o nach d im Zeitintervall t auf Route r

d_{odtr}^p Personennachfrage der Relation von o nach d im Zeitintervall t auf Route r

c^{veh} Fahrgastkapazität eines Fahrzeugs

c_{odtr}^{pool} Bündelungskapazität (engl. pooling) der Route r für Personennachfrage der Relation von o nach d im Zeitintervall t

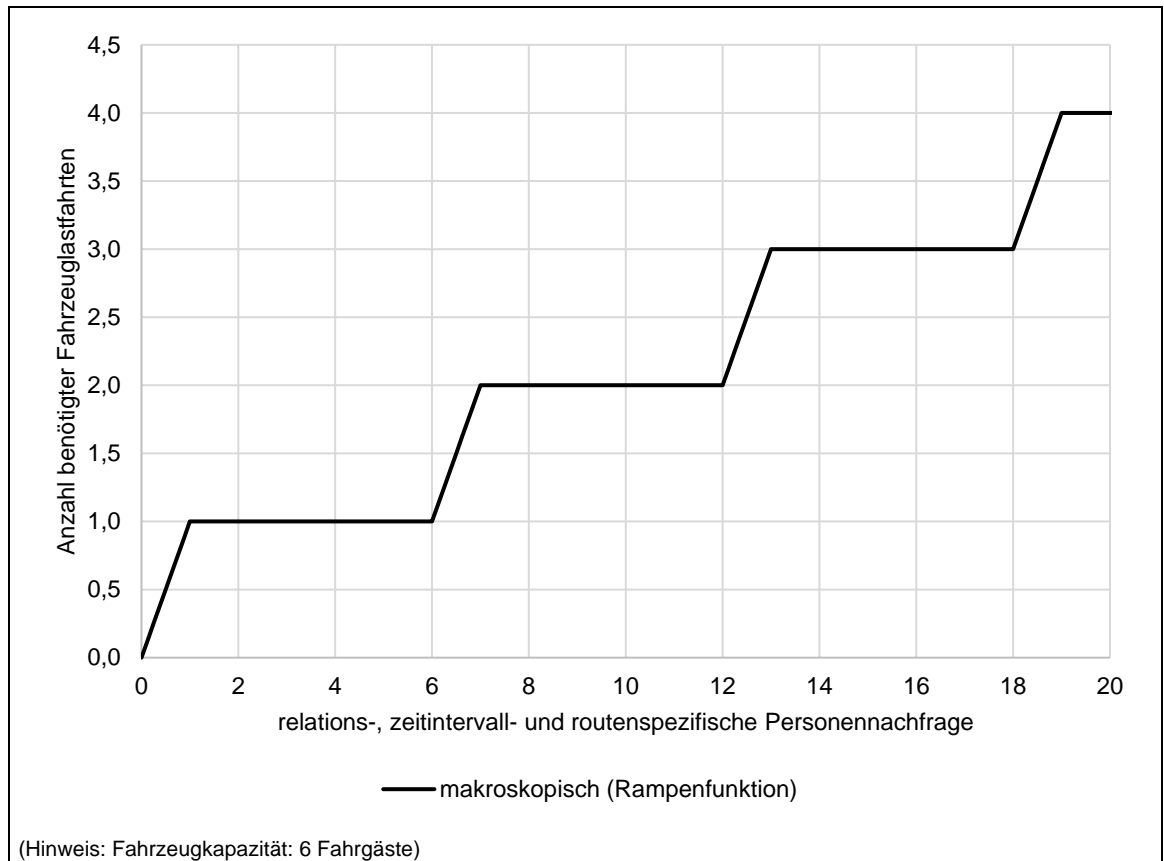


Abbildung 7: Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten in Abhängigkeit der Personennachfrage entsprechend makroskopischer Rampenfunktion (Formel (8)). Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen.

Über die Methodik von FRIEDRICH ET AL. (2018) und RICHTER ET AL. (2019) hinausgehend, wurde der Bündelungsalgorithmus zudem um die folgenden Funktionen erweitert, die sich durch die Anwendung in einem Angebotsmodell mit räumlich feiner differenziertem Planungsraum ergeben:

- Begrenzung des maximal in Kauf genommenen Umwegs, um zusätzliche Fahrgäste aufzunehmen.
- Ausgabe von Umwegfahrten zur Mitnahme zusätzlicher Fahrgäste in einer Umlungsmatrix.
- Berechnung relationsspezifischer Umwegfaktoren für die Nutzung von Ridesharing aufgrund der Mitnahme weiterer Fahrgäste (im Vergleich zu einer Direktfahrt).
- Implementierung von Einstiegszeit und Haltedauer des Ridesharingfahrzeugs je einsteigendem/aussteigendem Fahrgast, die in den Umwegigkeitsbetrachtungen der Bündelung berücksichtigt werden.

Je größer die Verkehrszellen eines Verkehrsnachfragemodells gewählt werden und je weniger detailliert das zugrundeliegende Straßennetz abgebildet ist, desto weniger detailliert kann der Bündelungsvorgang inklusive Umwegfahrten sowie Zu- und Ausstiegen von Fahrgästen abgebildet werden. Liegt eine grobe Zellenraasterung vor, werden nur

Routen mit genau übereinstimmenden Zellenfolgen gebündelt, da viele Umwegfahrten bereits innerhalb einer Zelle stattfinden. Diese können somit nur abstrahiert z.B. in Abhängigkeit der Zellengröße oder -lage berechnet werden (FRIEDRICH ET AL. (2018)).

Bei feiner disaggregierten Verkehrszellen hingegen kann es zielführend sein, einen Puffer um Strecken einzubeziehen, sodass auch benachbarte Verkehrszellen mit angefahren werden, sollte ein Fahrtwunsch vorliegen. Dadurch können auch Zu- und Abgangszeiten sowie Umwege zur Mitnahme zusätzlicher Fahrgäste besser abgebildet werden. Als Ridesharing-Haltepunkte, an denen Fahrgastwechsel möglich sind, werden Knotenpunkte empfohlen, die möglichst nah dem Zellschwerpunkt liegen. Welche Auswirkungen die Auswahl der Haltepunkte auf das Ridesharingangebot hat und wie diese möglichst optimal gewählt werden, wird in mehreren Arbeiten, beispielsweise von CZIOSKA ET AL. (2017), HARTL UND DUDT (2019) sowie GUNAWAN UND SUSILAWATI (2021) näher untersucht.

Die vorgestellte Modellierungsmethode kann sowohl für ganzzahlige als auch nicht-ganzzahlige Nachfrage angewendet werden. Bei großen Anwendungsfällen mit einer Vielzahl nachgefragter Relationen je Zeitintervall kann es in Hinblick auf die Rechenleistung notwendig sein, die Bündelung auf zeitintervallspezifische Relationen zu begrenzen, deren Nachfrage mindestens einem festzulegenden Nachfragegrenzwert entspricht. Diese Bündelungsgrenze wird in Kapitel 4.5 näher erläutert.

Tabelle 6 enthält eine Übersicht zur verwendeten Bündelungsmethode.

Eingangsdaten	Verarbeitung	Ergebnis und Kenngrößen
Variable Größen: <ul style="list-style-type: none"> • Räumlich und zeitlich differenzierte Personennachfrage: Ganzzahlige oder nicht-ganzzahlige Nachfrage in Form zeitintervallspezifischer Quelle-Ziel-Matrizen • Fahrzeugfahrzeiten 	Statisch (allwissend) je Zeitintervall, sequenzielles Abarbeiten der Zeitintervalle	Ergebnis: <ul style="list-style-type: none"> • Räumlich und zeitlich differenzierte Lastfahrten für <ol style="list-style-type: none"> (1) Relationen aller Halte inkl. Zwischenstopps und (2) Relationen des jeweils ersten und letzten Halts einer Fahrt: Ganzzahlige oder nicht-ganzzahlige Nachfrage in Form zeitintervallspezifischer Quelle-Ziel-Matrizen
Parameter: <ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeugkapazität • Bündelungsregeln: Max. Umweg absolut und relativ, Bündelungsgrenze • Einstiegszeit und Haltedauer je zunehmendem Fahrgast • Servicequalität: Max. Wartezeit in Form der Länge der Zeitintervalle 		Kenngrößen: <ul style="list-style-type: none"> • Lastfahrtkilometer/-stunden • Besetzungsgrade • Umwegfaktoren

Tabelle 6: Übersicht zur makroskopischen Bündelung.

Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere zu den folgenden Punkten:

- Eine zentrale und nicht abschließend geklärte Problemstellung liegt in der Bestimmung benötigter Fahrzeuglastfahrten bzw. deren Restkapazitätsberechnung für nicht-ganzzahlige Nachfrage. Eine erste Abschätzung zum Einfluss der jetzigen

Berechnungsmethode im Vergleich zu ganzzahligen Berechnungsmethoden erfolgt in den Kapiteln 4.2.3 und 4.2.4.

- Die Startwartezeit für Ridesharing kann nur aus der maximalen Wartezeit abgeleitet werden (FRIEDRICH ET AL. (2018)). Einen Vergleich auftretender Wartezeiten im fahrplangebundenen Verkehr und im Ridesharing bieten die H KRipoo (FGSV (2021)).
- Es werden nicht mehr Personenwege gebündelt als die Bündelungskapazität der Route erlaubt. Der Fall, dass eine Person aussteigt, woraufhin sich die Restkapazität auf dem folgenden Streckenabschnitt wieder erhöht, wird nicht berücksichtigt. Durch die Sortierung der Routen nach ihrer Länge wird der so entstehende mindernde Effekt auf den Besetzungsgrad minimiert, kann jedoch je nach Anwendungsfall großen Einfluss auf den durchschnittlichen Besetzungsgrad der Ridesharingfahrten haben.
- Personennachfrage wird nur innerhalb eines Zeitintervalls gebündelt, was zu Ungenauigkeiten bei längeren Ortsveränderungen führt, die mehrere Zeitintervalle umfassen (FRIEDRICH ET AL. (2018)). Der Effekt auf den Ridesharing-Besetzungsgrad ist abhängig von der zeitlichen Verteilung der Nachfrage.
- Weitere Einflussfaktoren auf den Bündelungsgrad des Algorithmus sollten näher untersucht werden. Der Bündelungsgrad entspricht als Quotient aus Nachfrage in Personenwegen und Fahrzeuglastfahrtanzahl dem durchschnittlichen Besetzungsgrad je Fahrzeuglastfahrt. Zu den weiteren Einflussfaktoren zählen beispielsweise Zeitintervalllänge und Verkehrszellengröße, Zu- und Abgangsweiten zu Ridesharing-Haltpunkten, die durchschnittliche Fahrtweite einer Ridesharingfahrt, die Fahrzeugkapazität oder maximal in Kauf genommene Umwege zur Mitnahme weiterer Fahrgäste. Der Einfluss der Zeitintervalllänge und damit der maximalen Wartezeit wird in Kapitel 4.2.2 untersucht.

4.2.2 Einfluss der maximalen Wartezeit auf Fahrzeuglastfahrtanzahl und Besetzungsgrad

Der durchschnittliche Besetzungsgrad der Fahrzeuglastfahrten gibt an, wie viele Fahrzeuglastfahrten benötigt werden, um eine gegebene Gesamtpersonennachfrage zu bedienen. Die angestrebte Servicequalität in Hinblick auf die Wartezeit, die ein Fahrgast maximal auf ein Fahrzeug warten muss, ist wiederum ein entscheidender Einflussfaktor des Besetzungsgrads. Unter anderem beeinflusst die maximale Wartezeit den wahrgenommenen Nutzen der Alternative Ridesharing in der Moduswahl. Die Nachfrageberechnung steht jedoch nicht im Fokus dieses Kapitels. Bedeutend ist an dieser Stelle, dass die maximale Wartezeit auch als Länge von Zeitintervallen interpretiert werden kann, innerhalb deren die jeweils auftretende Nachfrage bedient werden muss. Die maximale Wartezeit entspricht der Länge der Zeitintervalle in die die Ridesharingnachfrage disaggregiert wird. Im Folgenden wird der Einfluss der Länge dieser Zeitintervalle, also der

maximalen Fahrgastwartezeit, auf die benötigte Lastfahrtnanzahl zum Bedienen einer gegebenen Nachfrage untersucht.

Gesucht wird der Erwartungswert der Anzahl benötigter Lastfahrten in Abhängigkeit der Gesamtnachfrage eines Betrachtungszeitraums sowie der Anzahl äquidistanter Zeitintervalle in die dieser unterteilt wird. Grundsätzlich gilt, dass Personennachfragen in einer Fahrzeugfahrt gebündelt werden können, deren Nachfrage im gleichen Zeitintervall auftritt. Räumliche Unterschiede werden also nicht betrachtet. Unter dieser Prämisse und weiteren vereinfachenden Annahmen lässt sich der gesuchte Erwartungswert entsprechend Formel (10) bestimmen.

Formel (10) lässt sich wie folgt herleiten:

- Grundannahmen: Für einen Betrachtungszeitraum ist sowohl die Gesamtnachfrage $|D^p|$ als auch die Anzahl der Zeitintervalle n_T gegeben. Die Gesamtnachfrage verteilt sich vereinfachend entsprechend einer Gleichverteilung auf die Zeitintervalle des Betrachtungszeitraums. Der Lösungsraum besteht aus allen Variationsmöglichkeiten, die sich ergeben, wenn die Gesamtnachfrage ganzzahlig auf die Zeitintervalle aufgeteilt wird.
- Bündelungsregeln: Es wird jeweils die Personennachfrage zu einer Fahrzeuglastfahrt gebündelt, die im gleichen Zeitintervall auftritt. Begrenzendes Kriterium stellt dabei die Fahrzeugkapazität c^{veh} dar. Ist ein Fahrzeug vollständig belegt, wird für zusätzliche Nachfrage im gleichen Zeitintervall ein weiteres Fahrzeug benötigt. Es werden keine Umlaufbildung oder sonstige räumliche Betrachtungen berücksichtigt, sodass nachgefragte Fahrzeugabfahrten stets genau einer Fahrzeuglastfahrt entsprechen.
- Produkt der Faktoren 1 bis 3: Dieser Teil der Formel entspricht der Wahrscheinlichkeitsfunktion einer Binomialverteilung. Es wird die Wahrscheinlichkeit bestimmt, dass d_i^p die Personennachfrage eines bestimmten Zeitintervalls t ist und die gesamte restliche Nachfrage $|D^p| - d_i^p$ in anderen Zeitintervallen auftritt.
- Summe des Produkts der Faktoren 1 bis 4: Der Erwartungswert der Nachfrage eines spezifischen Zeitintervalls t ergibt sich als Summe der Wahrscheinlichkeiten über alle möglichen Nachfrageausprägungen D^p eines Zeitintervalls multipliziert mit der jeweiligen Nachfrage d_i^p . Das entspricht der Berechnung des Erwartungswerts einer Wahrscheinlichkeitsverteilung diskreter Zufallsgrößen. Um den Erwartungswert der benötigten Fahrzeuglastfahrten zu erhalten, wird statt d_i^p der aufgerundete Quotient aus der jeweiligen Personennachfrage des Zeitintervalls d_i^p und der Fahrzeugkapazität c^{veh} als Faktor 4 verwendet. Das entspricht der Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten des betrachteten Zeitintervalls.
- Summe des Produkts der Faktoren 1 bis 5: Um den Einfluss der Anzahl der Zeitintervalle auf den gesamten Betrachtungszeitraum zu bestimmen, wird der Erwartungswert benötigter Fahrzeuglastfahrten eines Zeitintervalls (Summe des Produkts der

Faktoren 1 bis 4) mit der Anzahl n_T der Zeitintervalle des Betrachtungszeitraums multipliziert. So ergibt sich die zu erwartende Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten im Betrachtungszeitraum.

$$d^{veh,o} = \sum_{d_t^p \in D^p} \binom{|D^p|}{d_t^p} \cdot \left(\frac{1}{n_T}\right)^{d_t^p} \cdot \left(\frac{n_T-1}{n_T}\right)^{|D^p|-d_t^p} \cdot \left\lceil \frac{d_t^p}{c^{veh}} \right\rceil \cdot n_T \quad (10)$$

mit

$d^{veh,o}$	Erwartungswert benötigter Fahrzeuglastfahrten (vehicle, occupied)
d_t^p	Personennachfrage d^p in einem bestimmten Zeitintervall $t \in T$
T	Menge aller Zeitintervalle $T = \{1, 2, \dots, T \}$
D^p	Menge der möglichen Ausprägungen der Personennachfrage eines Zeitintervalls d_t^p mit $D^p = \{0, 1, 2, \dots, D^p \}$, wobei $ D^p = d^p = \sum_{t \in T} d_t^p$
n_T	Anzahl der Zeitintervalle $n_T = T $
c^{veh}	Fahrgastkapazität eines Fahrzeugs

Wird der Anschaulichkeit halber der Betrachtungszeitraum auf eine Stunde festgelegt, ergibt sich beispielsweise bei zwei Zeitintervallen eine maximale Wartezeit von 30 Minuten, bei vier Zeitintervallen von 15 Minuten und so weiter. Da sich auch die zweite Eingangsgröße, die Gesamtnachfrage, auf den Betrachtungszeitraum bezieht, hat dessen absolute Länge keinen Einfluss, die Festlegung erleichtert jedoch die Interpretation der Ergebnisse.

Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen zum einen den Erwartungswert benötigter Fahrzeuglastfahrten und zum anderen deren durchschnittlichen Besetzungsgrad in Abhängigkeit von Gesamtnachfrage und Anzahl der Zeitintervalle. Der durchschnittliche Besetzungsgrad ergibt sich als Quotient der Personennachfrage und des Erwartungswerts der benötigten Fahrzeuglastfahrten im Betrachtungszeitraum.

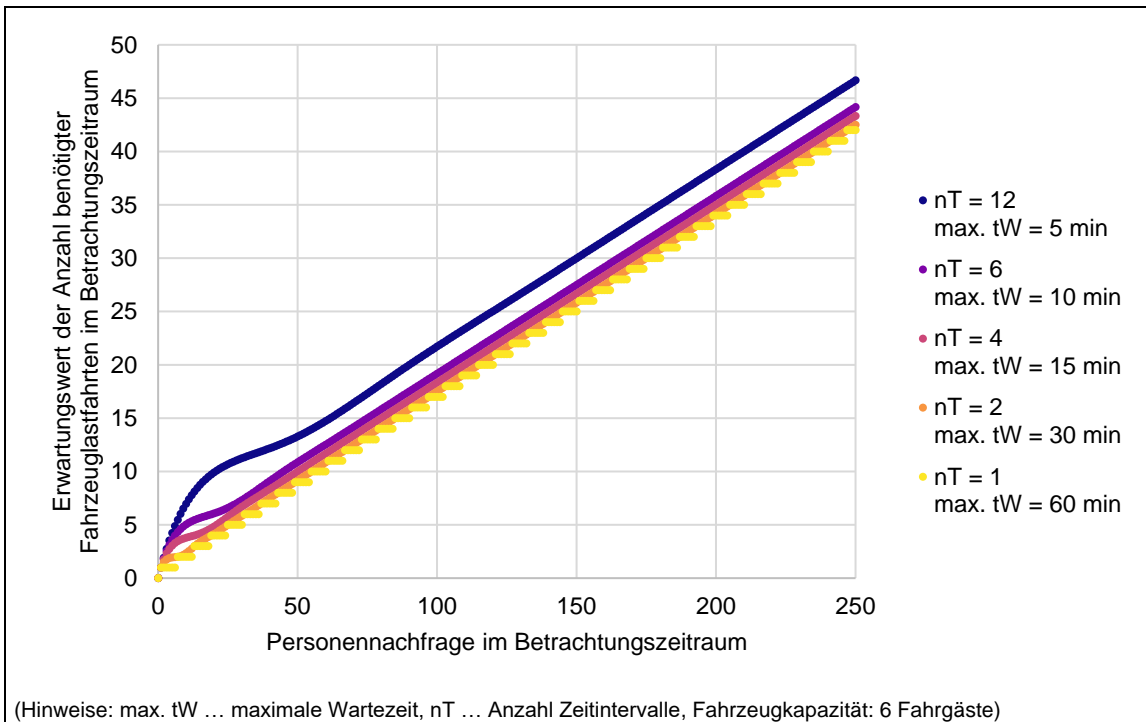


Abbildung 8: Erwartungswert der Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten, um die gegebene, im Betrachtungszeitraum gleichverteilte Personennachfrage vollständig zu bedienen. Szenarien für maximale Fahrgastwartezeiten bei einem Betrachtungszeitraum von 60 Minuten und einer Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen.

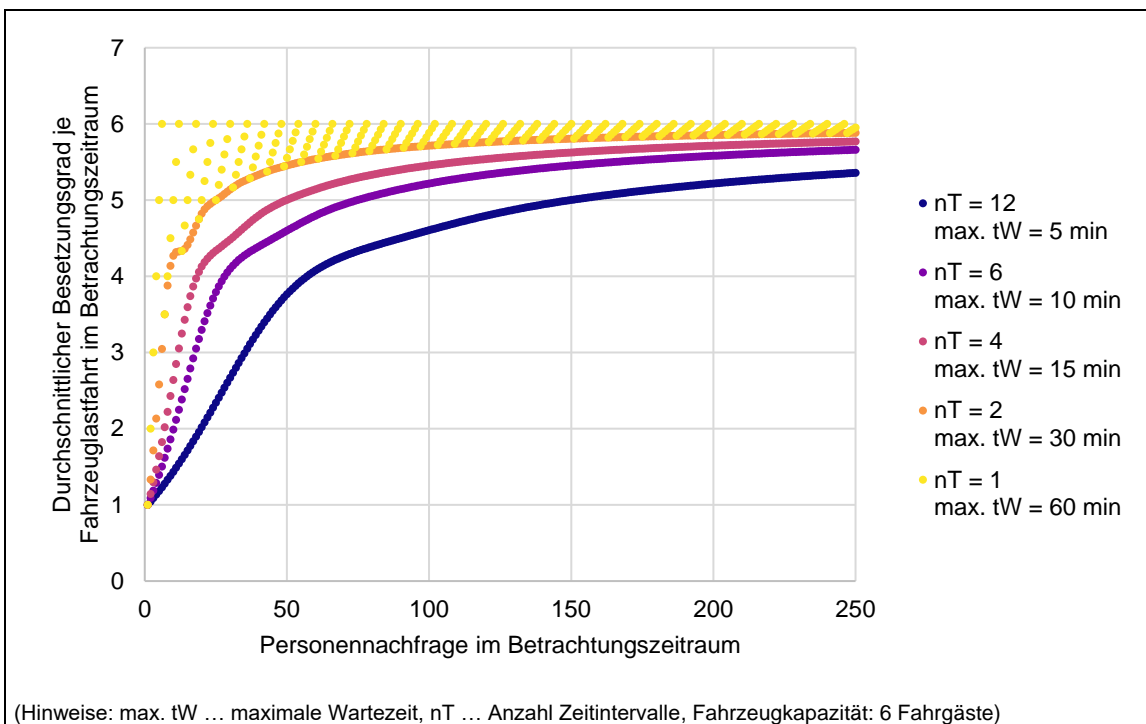


Abbildung 9: Durchschnittlicher Besetzungsgrad je benötigter Fahrzeuglastfahrt entsprechend Abbildung 8. Betrachtungszeitraum von 60 Minuten und Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen.

Wird der Betrachtungszeitraum in nur ein Zeitintervall unterteilt, ergibt sich die benötigte Fahrzeuganzahl als ganzzahlig aufgerundeter Quotient aus Personennachfrage und Fahrzeugkapazität. Dadurch kommt ein stufenförmiger Verlauf für $n_T = 1$ in Abbildung 8 zustande. Für jeweils die Gesamtnachfrage, die einem Vielfachen der Fahrzeugkapazität addiert um eins entspricht, stimmt die zu erwartende Fahrzeugfahrtanzahl von $n_T = 1$ und $n_T = 2$ überein. In diesem Fall wird für jede Variation der Nachfrageaufteilung mit $n_T = 2$ die gleiche Fahrzeuganzahl benötigt.

Durch die stufenförmige Verteilung der Erwartungswerte der Fahrzeugfahrten für $n_T = 1$ ergibt sich bei der zugehörigen Verteilung der Besetzungsgrade (Abbildung 9) eine größere Streuung als für Werte mit höherer Zeitintervallanzahl. Entspricht die Nachfrage einem Vielfachen der Fahrzeugkapazität, wird der maximale Besetzungsgrad gleich dieser Fahrzeugkapazität erreicht. Unter Betrachtung mehr als eines Zeitintervalls wird die Fahrzeugkapazität als durchschnittlicher Besetzungsgrad nicht mehr erreicht, da stets der Mittelwert verschiedener Variationen der Nachfrageaufteilung gebildet wird.

Im Vergleich der Graphen der einzelnen Zeitintervallanzahlen ist zu erkennen, dass auch bei hoher Gesamtnachfrage die Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten höher ist, je niedriger die maximale Wartezeit festgelegt wird. Insbesondere beim Wechsel von 10 Minuten auf 5 Minuten als maximale Wartezeit ist die Differenz der Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten zwischen den betrachteten Wartezeitszenarien auffallend hoch (siehe Abbildung 8). Die Anzahl der bei einer Wartezeitreduktion von 5 Minuten jeweils zusätzlich benötigten Fahrzeuglastfahrten liegt beim Wechsel von 15 auf 10 Minuten deutlich unterhalb der Anzahl zusätzlich benötigter Fahrten beim Wechsel von 10 auf 5 Minuten. Gleiches spiegelt sich im Besetzungsgrad wider (siehe Abbildung 9): Bei hohen Anforderungen an die Servicequalität und somit geringen Wartezeiten für den Fahrgast, fällt der durchschnittliche Besetzungsgrad niedriger aus als bei höheren Wartezeiten. Nichtsdestotrotz nähert sich der durchschnittliche Besetzungsgrad auch niedrigerer Wartezeit-szenarien bei steigender Gesamtnachfrage asymptotisch der Fahrzeugkapazität an. Grund dafür ist, dass vollbesetzte Fahrzeugfahrten einen zunehmenden Anteil an den Gesamtfahrten bilden.

Neben dem Verlauf der Erwartungswerte in Abhängigkeit von Gesamtnachfrage und Wartezeit, lassen sich bei spezifischer Betrachtung weitere für die Planung eines Ridesharingangebots hilfreiche Kennwerte ableiten: Bei einer Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen muss bei einer maximalen Wartezeit von 5 Minuten beispielsweise die Personennachfrage bei mindestens 36 Fahrtwünschen je Stunde liegen, um einen durchschnittlichen Besetzungsgrad von 3 Fahrgästen, also eine Fahrzeugauslastung von 50 Prozent, zu erreichen. Bei einer maximalen Wartezeit von 10 Minuten liegt dieser Wert bei mindestens 18 Fahrtwünschen je Stunde. Die 36 bzw. 18 Fahrtwünsche entsprechen der Hälfte der theoretisch möglichen Fahrgastkapazität bei 12 bzw. 6 Abfahrten je Stunde (Produkt aus Fahrzeugkapazität und Anzahl der Zeitintervalle). Liegt diese Nachfrage vor, bzw. lässt sie sich abschätzen, dann kann ein Ridesharinganbieter eine maximale Wartezeit von 5 bzw. 10 Minuten als Servicequalität versprechen. Und gleichzeitig ist für den Anbieter absehbar, dass die Fahrzeuge im Schnitt zu 50 Prozent besetzt sind.

Als weiterer interessanter Kennwert ist die Nachfrage-Wartezeit-Kombination, an der der durchschnittliche Besetzungsgrad einer Fahrzeugfahrt bei mehr als 1,3 Fahrgästen liegt, ableitbar. Liegt die Nachfrage unter der diesem Besetzungsgrad zugeordneten Nachfrage, ist der Besetzungsgrad des Ridesharing geringer als der durchschnittliche Besetzungsgrad eines privaten Pkw und daher im Sinne einer Reduktion von Fahrleistung durch Ridesharing keine verkehrsplanerisch zielführende Alternative. Bei einer maximalen Wartezeit von 5 Minuten liegt diese Mindestnachfrage beispielsweise bei 8 Personenfahrten je Stunde, bei 10 Minuten bei 5 Personenfahrten je Stunde und nimmt mit steigender maximaler Wartezeit weiter ab.

Bei diesen Werten sei nochmals auf die folgenden Einschränkungen der zugrundeliegenden Berechnung verwiesen:

- Annahme der Gleichverteilung der Fahrtwünsche im Betrachtungszeitraum
- Keine Berücksichtigung der Nachfragewirkungen (z.B. ist ein Angebot mit geringen Wartezeiten auch attraktiver und führt zu höherer Nachfrage) und Auswirkungen der Wartezeitusage auf betriebliche Aufwände und benötigte Flottengröße (keine Umlaufbildung)
- Keine Betrachtung der räumlichen Bündelung: Die beschriebene Gesamtnachfrage im Betrachtungszeitraum bezieht sich also auf je genau eine Quelle-Ziel-Relation. Dadurch können jeweils alle auftretenden Fahrtwünsche gebündelt werden, sofern sie im gleichen Zeitintervall auftreten.

4.2.3 Beispielrechnung zum Einfluss der makroskopischen Nachfragebetrachtung

Im Folgenden wird der Unterschied zwischen einem mikroskopischen und einem makroskopischen Ansatz zur Berechnung der benötigten Lastfahrtenzahl herausgearbeitet. In makroskopischen Ansätzen steht Nachfrage als Mittelwert einer beobachteten Verteilung bzw. als Erwartungswert einer Wahrscheinlichkeitsverteilung als Eingangsgröße zur Verfügung. Anhand dieser mittleren Nachfrage wird eine im Mittel benötigte Lastfahrtenanzahl berechnet. Mikroskopische Ansätze hingegen verwenden diskrete und ganzzahlige Nachfragewerte, die Wahrscheinlichkeitsverteilungen entsprechend zufällig ausgewählt werden. Für eine so erzeugte spezifische Nachfragesituation wird die Anzahl benötigter Lastfahrten ermittelt. Es werden viele Simulationen verschiedener Nachfragesituationen durchgeführt und anschließend Mittelwerte der Kenngrößen gebildet, die das Ergebnis der mikroskopischen Berechnung darstellen.

Im Folgenden wird an einem stark vereinfachten Beispiel der Einfluss der unterschiedlichen Nachfragebetrachtungen auf das Bündelungsergebnis untersucht. Es werden je vier ganzzahlige Nachfragewerte d_h^p zu einer Nachfragevariation H zusammengefasst. Damit ist in dieser Beispielrechnung die Anzahl der Elemente je Nachfragevariation n_H

gleich 4. Der Mittelwert der vier Nachfragewerte (Formel (11)) stellt die mittlere Personennachfrage der Nachfragevariation und damit den Eingangswert der makroskopischen Berechnung zur Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten dar (Formel (12)). Für den mikroskopischen Vergleichswert hingegen wird für jeden einzelnen Nachfragewert die benötigte Anzahl an Lastfahrten bestimmt und anschließend deren Mittelwert gebildet (Formel (13)).

$$\overline{d^{p,H}} = \frac{1}{n_H} \cdot \sum_{h \in H} d_h^p \quad (11)$$

$$\overline{d_{makro}^{veh,o}} = f\left(\overline{d^{p,H}}\right) \quad (12)$$

$$\overline{d_{mikro}^{veh,o}} = \frac{1}{n_H} \cdot \sum_{h \in H} f\left(d_h^p\right) \quad (13)$$

mit

$\overline{d^{p,H}}$ mittlere Personennachfrage d^p einer Nachfragevariation

H Menge der Elemente h einer Nachfragevariation

n_H Anzahl der Elemente einer Nachfragevariation

d_h^p Personennachfrage des Elements h

$\overline{d_{makro}^{veh,o}}$, $\overline{d_{mikro}^{veh,o}}$ Mittelwert benötigter Fahrzeuglastfahrten nach makroskopischer bzw. mikroskopischer Berechnungsweise

Es werden insgesamt 2.401 Nachfragevariationen untersucht, die sich aus der Kombinatorik von jeweils vier Nachfragewerten ergeben, die je eine Nachfrage zwischen einschließlich null und sechs Personenfahrten enthalten (7 Nachfrageausprägungen hoch 4 Elementen einer Nachfragevariation ergeben 2.401 mögliche Nachfragevariationen). Es ergibt sich die in Abbildung 10 dargestellte Verteilung der mittleren Personennachfrage über alle untersuchten Nachfragevariationen mit einem Mittelwert von drei Personenfahrten. Die mittlere Personennachfrage der betrachteten Nachfragevariationen liegt zwischen null und sechs Personenfahrten und steigert sich in Schritten von 0,25 Personenfahrten. Die Schrittweite ist auf die Aufteilung der Nachfrage in vier ganzzahlige Nachfragewerte zurückzuführen.

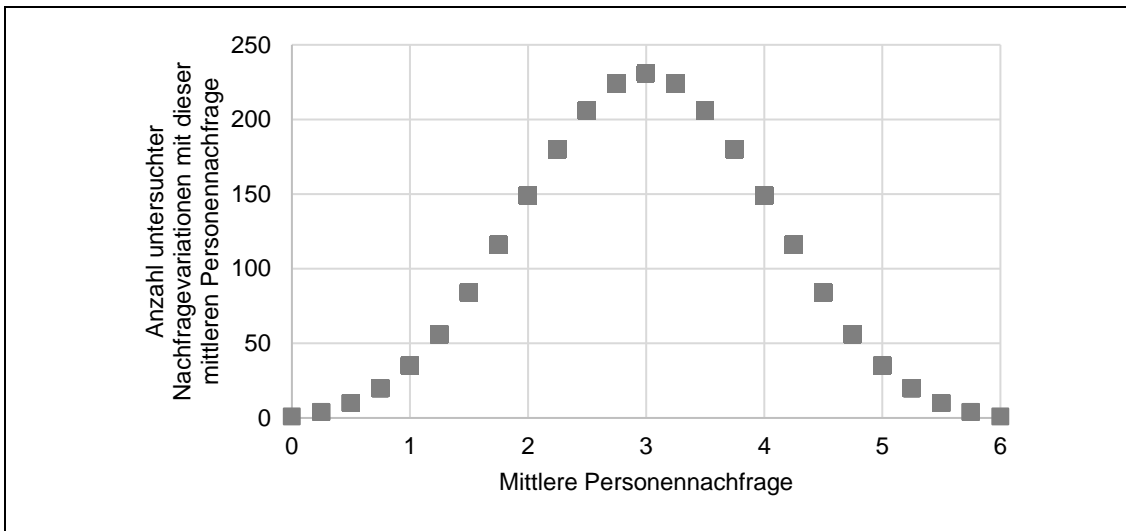


Abbildung 10: Verteilung der mittleren Personennachfrage über die untersuchten Nachfragevariationen.

Unter Verwendung der in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Berechnungsmethodik und unter Annahme einer Fahrzeugkapazität von drei Fahrgästen, ergeben sich die in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellten Ergebnisse in Bezug auf die mittlere Anzahl benötigter Lastfahrten und deren durchschnittlichen Besetzungsgrad.

Analog zum vorangehenden Kapitel 4.2.2 werden keine räumlichen Aspekte der Fahrtenbündelung berücksichtigt: Tritt die Personennachfrage im gleichen Element einer Nachfragevariation auf, können diese Personenfahrten, unter Beachtung der Fahrzeugkapazität, auch in einer Fahrzeugfahrt gebündelt werden.

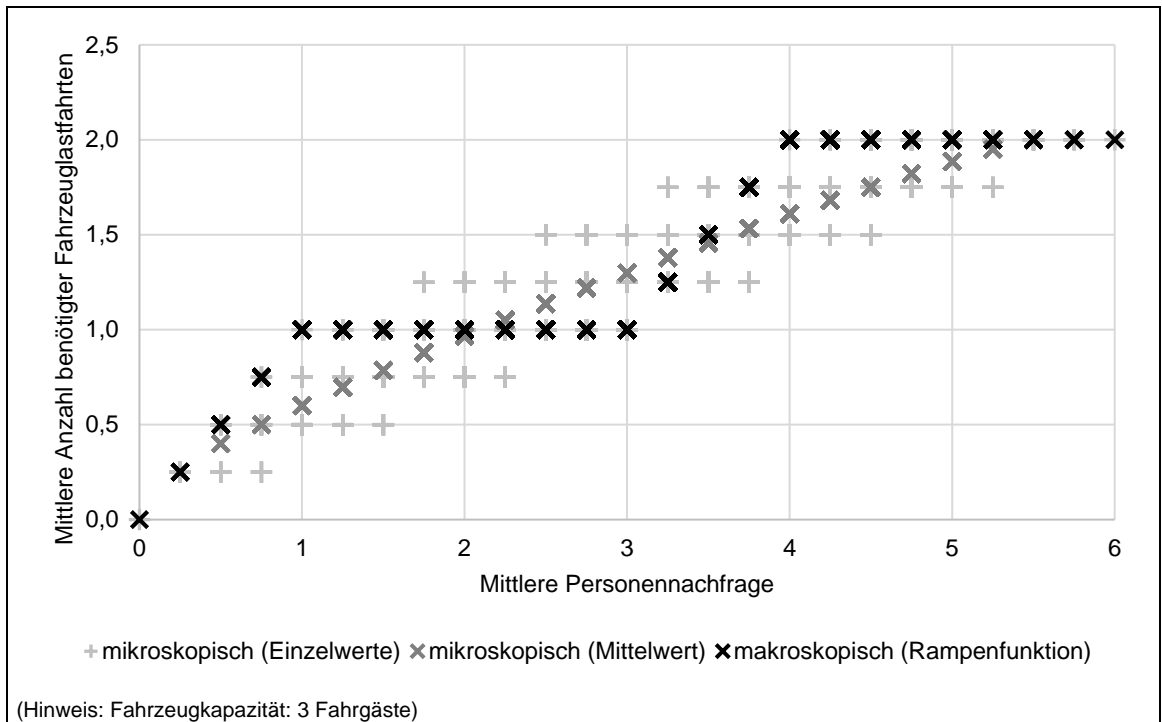


Abbildung 11: Mittlere Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten zum Bedienen der gegebenen Nachfragevariation bei einer Fahrzeugkapazität von 3 Fahrgästen. Für die mikroskopische Berechnung werden die Ergebnisse einzelner Nachfragevariationen sowie der Mittelwert der benötigten Fahrzeuglastfahrten über alle Nachfragevariationen mit dieser mittleren Personennachfrage angegeben.

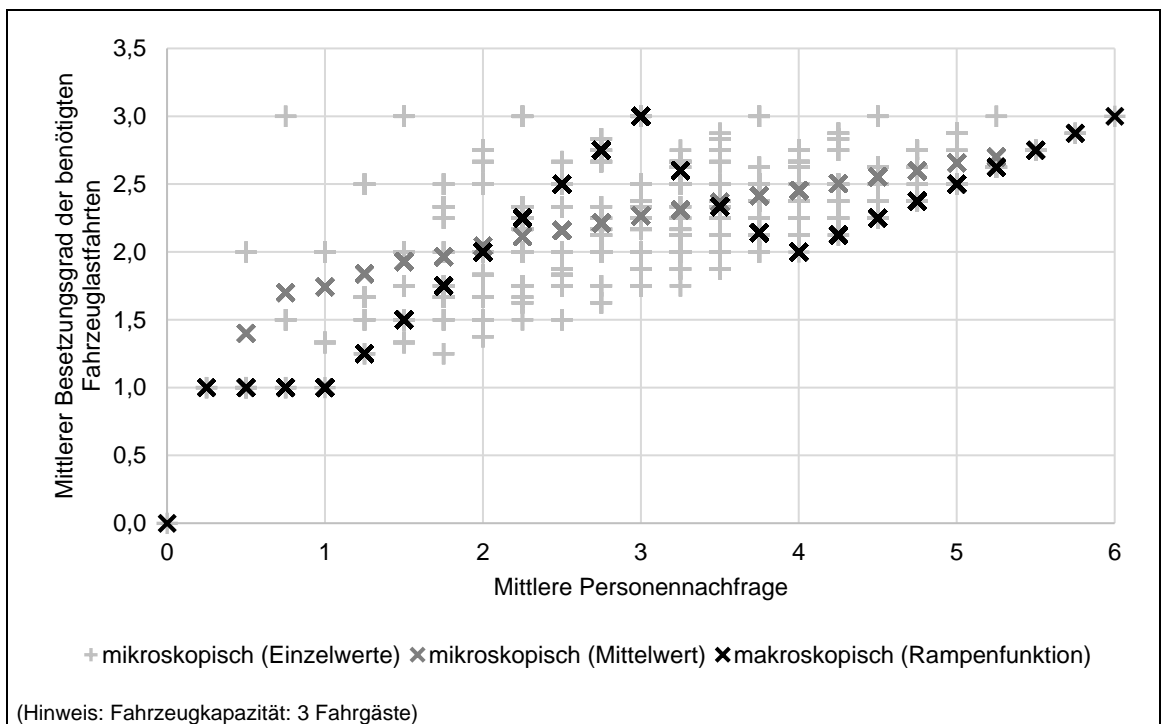


Abbildung 12: Mittlerer Besetzungsgrad der entsprechend Abbildung 11 benötigten Fahrzeuglastfahrten bei einer Fahrzeugkapazität von 3 Fahrgästen.

Aufgrund der stark vereinfachenden Annahmen dieser Beispielrechnung ist ihre Aussagekraft begrenzt. Insbesondere für mittlere Personennachfragewerte von mehr als 3 Personen werden nur zunehmend wenige der insgesamt möglichen, zu dieser mittleren Nachfrage führenden Variationen betrachtet (vgl. Abbildung 10). Dies liegt begründet in der Begrenzung der Nachfrage auf maximal 6 Personenfahrten je Element einer Nachfragevariation.

Es lassen sich folgende Erkenntnisse gewinnen:

- Sowohl in Bezug auf die Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten als auch deren Besetzungsgrad ist zu erkennen, dass sich Unter- bzw. Überschätzung der Anzahl benötigter Lastfahrten durch den makroskopischen Ansatz im Vergleich zur mikroskopischen Herangehensweise über verschiedene mittlere Personennachfragewerte hinweg in etwa ausgleichen.
- Im Bereich geringer Personennachfrage von weniger als einer Personenfahrt liegt die makroskopisch berechnete mittlere Lastfahrtanzahl über den mikroskopischen Vergleichswerten.
- Die Differenz zwischen mittlerem Besetzungsgrad in mikroskopischen und makroskopischen Berechnungen nimmt bei zunehmender mittlerer Personennachfrage ab, da der Anteil voll besetzter Fahrzeugfahrten steigt.

4.2.4 Ansatz zu einer alternativen Berechnungsmethode für Fahrzeuglastfahrtanzahl und Restkapazität

Dieses Kapitel ergibt sich als Schlussfolgerung und Kombination der Untersuchungen in den Kapiteln 4.2.2 und 4.2.3. Abbildung 13 (zusammenfassend) sowie Abbildung 14 (feiner aufgeschlüsselt) zeigen die Verläufe der erwarteten Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten in Abhängigkeit des Erwartungswerts der Personennachfrage je Zeitintervall. Das entspricht den Ergebnissen aus Abbildung 8, S. 64, die die im Betrachtungszeitraum erwartete Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten in Abhängigkeit der Personennachfrage des Betrachtungszeitraums und der Anzahl der Zeitintervalle, in die dieser unterteilt wird, wiedergibt. Diese Personennachfrage und die zugehörige Lastfahrtanzahl sind in Abbildung 13 und Abbildung 14 umgerechnet in Erwartungswerte je Zeitintervall dargestellt. Als Erwartungswert je Zeitintervall dient jeweils der Quotient aus Personennachfrage bzw. Fahrtenanzahl im Betrachtungszeitraum und verwendeter Zeitintervallanzahl. Je Graph in Abbildung 13 und Abbildung 14 liegt der je Zeitintervall erwarteten Personennachfrage somit eine andere Anzahl an Zeitintervallen zugrunde, auf die die variable Gesamtnachfrage des Betrachtungszeitraums aufgeteilt wird (vgl. Kapitel 4.2.2).

Die Darstellung des Erwartungswerts benötigter Fahrzeuglastfahrten auf Grundlage des Erwartungswerts der Personennachfrage (Abbildung 13 und Abbildung 14) entspricht der Berechnungsweise makroskopischer Ansätze. Der als schwarze Linie dargestellte Graph ergänzt Abbildung 13 und Abbildung 14 daher um die makroskopischen

Vergleichswerte entsprechend der in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Methode (Formel (8), S. 58). Im Gegensatz zu den anderen Graphen in Abbildung 13 und Abbildung 14, ergibt sich der Graph der makroskopischen Rampenfunktion nicht aus diskreten Werten sondern einer stetigen Funktion. Die makroskopische Rampenfunktion schließt die Punkte des Graphen der auf einem Zeitintervall beruhenden Erwartungswerte ein.

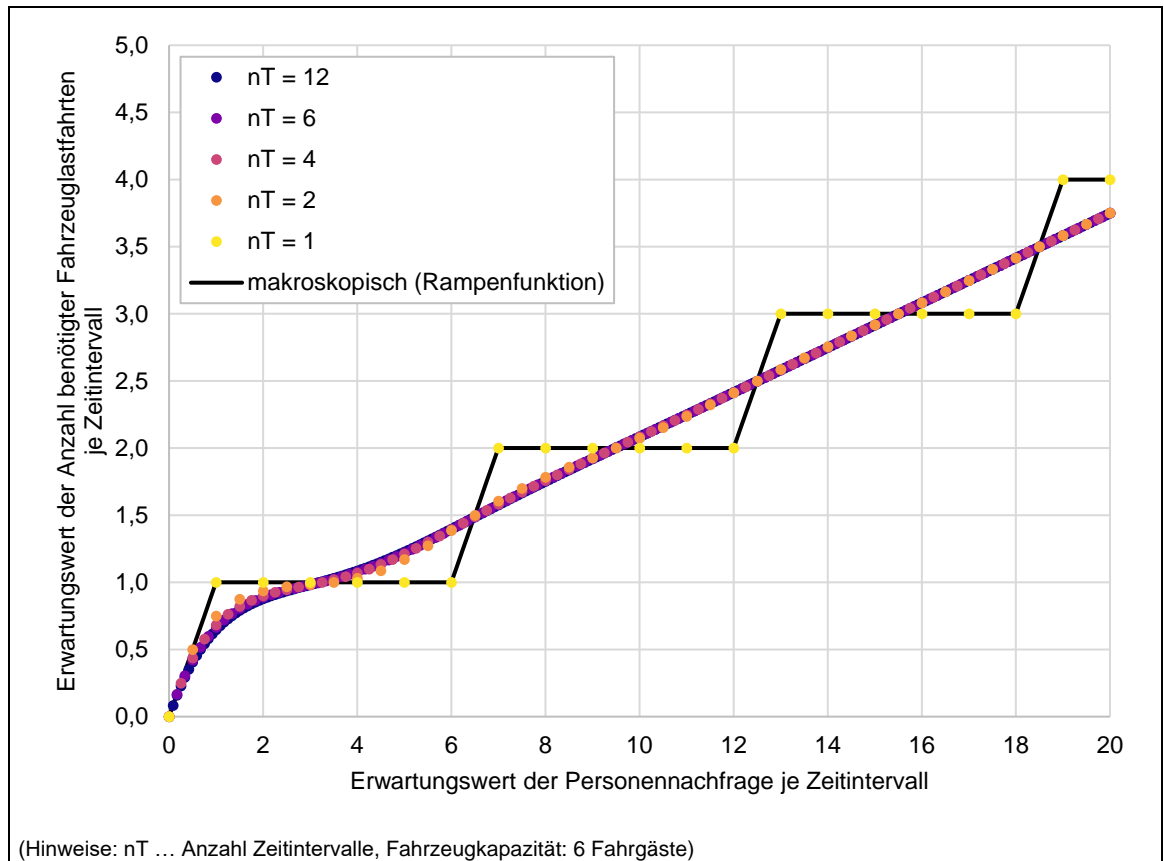


Abbildung 13: Erwartungswert der Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten je Zeitintervall, um die gegebene, im Betrachtungszeitraum auf Zeitintervalle gleichverteilte Personennachfrage vollständig zu bedienen, entsprechend Abbildung 8, S. 64. Ergänzt um makroskopische Rampenfunktion (Formel (8), S. 58). Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen.

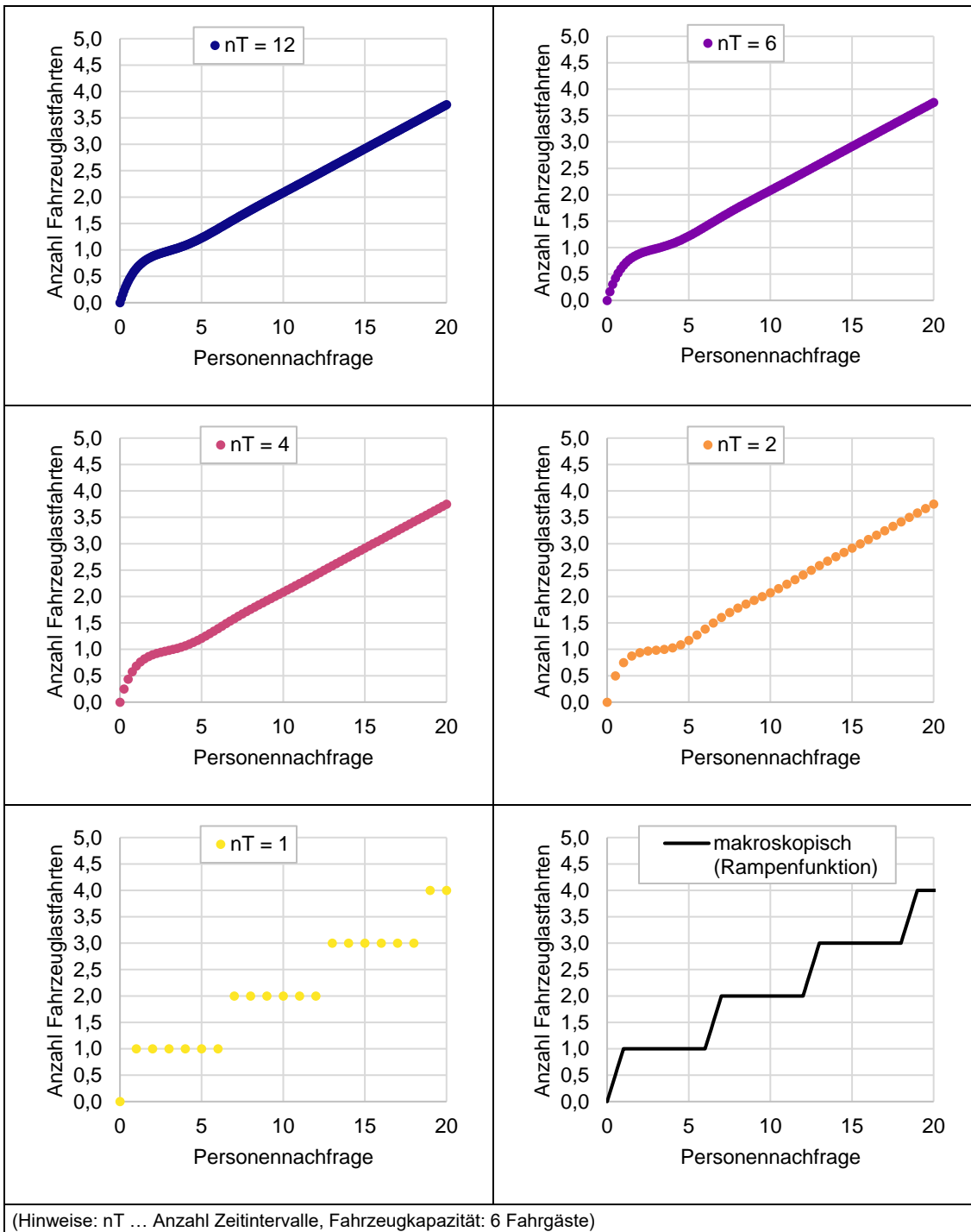


Abbildung 14: Aufschlüsselung der in Abbildung 13 dargestellten Graphen zur Bestimmung des Erwartungswerts der Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten in Abhängigkeit der Personennachfrage. Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen.

Für einen Teilbereich des Graphen von vier Zeitintervallen gleicht Abbildung 13, bei anderer angenommener Fahrzeugkapazität, Abbildung 11, S. 69 (Mittlere Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten zur Bedienung der in der Beispielrechnung gegebenen Nachfragevariation). Anstatt der in Kapitel 4.2.3 verwendeten Beispielnachfragevariationen

ergibt sich der Lösungsraum (in Kapitel 4.2.2 und damit auch in Abbildung 13) je erwarteter Personennachfrage je Zeitintervall aus allen Nachfragevariationen, die bei ganzzahliger Nachfrage, vier Zeitintervallen und einer Gesamtnachfrage von viermal der zeitintervallfeinen Nachfrage möglich sind. Dieser zugrundeliegende Lösungsraum umfasst jeweils die nach Formel (14) exponentiell ansteigende Anzahl möglicher Nachfragevariationen.

$$n_{Var} = n_T^{d^P} \quad (14)$$

mit

n_{Var} Anzahl möglicher Nachfragevariationen bei ganzzahliger Nachfrage

n_T Anzahl der Zeitintervalle, auf die die Nachfrage aufgeteilt wird

d^P Gesamtnachfrage des Betrachtungszeitraums, d.h. Anzahl der Personen, die jeweils ein Zeitintervall wählen

Die in Abbildung 13 abgebildeten Erwartungswerte für die Berechnung mit einem Zeitintervall und somit je genau einer Nachfragevariation je Personennachfragewert liegen auf den Horizontalen der makroskopischen Rampenfunktion. Erwartungswerte für Szenarien mit mehr als einem Zeitintervall haben jedoch einen davon abweichenden Verlauf, da ihnen jeweils mehr als eine Nachfragevariation zugrunde liegt, deren Mittelwert gebildet wird.

Unter der Annahme, dass die gleichverteilte Aufteilung von Nachfrage auf Zeitintervalle (Kapitel 4.2.2) mit der Bestimmung von Nachfrage eines Simulationslaufs in einer mikroskopischen Berechnung vergleichbar ist, stellt der Verlauf der in Abbildung 13 dargestellten Graphen einen vielversprechenden Ansatz zur makroskopischen Fahrzeuglastfahrtbestimmung in Abhängigkeit der gegebenen makroskopischen Nachfrage dar. Dies gilt insbesondere für Werte der mittleren Lastfahrtanzahl, die sich aus einer höheren Anzahl von Nachfragevariationen ableiten. Durch die Mittelwertbildung aus Ergebnissen der Nachfragevariationen können auch Lastfahrtwerte für nicht-ganzzahlige Personennachfragewerte abgeleitet werden.

Positiv hervorzuheben ist, dass eine Berechnung der Fahrzeuganzahl mittels einer an diese Graphen angenäherten Funktion keine konstanten Abschnitte wie die in Kapitel 4.2.1 vorgestellte Formel (8), S. 58 (Rampenfunktion) aufweist. Das ist intuitiv besser mit dem makroskopischen Modellierungsgedanken vereinbar, da damit diskrete Fahrzeuglastfahrten lediglich der Erwartungswertberechnung zugrunde liegen und nicht Ergebnis des Bündelungsalgorithmus sind.

In Abbildung 13 ist ferner zu erkennen, dass sich die Graphen mit steigenden Erwartungswerten der Personennachfrage einem linear steigenden Verlauf annähern. Bei auf einer höheren Zeitintervallanzahl beruhenden Graphen findet die Annäherung früher statt als bei denen niedrigerer Zeitintervallanzahlen. Der lineare Zusammenhang lässt sich mittels folgender Formel ausdrücken:

$$d_{odt}^{veh,o} = \frac{d_{odt}^p}{c^{veh}} + 0,5 - \frac{0,5}{c^{veh}} \quad (15)$$

mit

$d_{odt}^{veh,o}$ Erwartungswert benötigter Fahrzeuglastfahrten $d^{veh,o}$ je Quelle-Ziel-Relation und Zeitintervall

d_{odt}^p Erwartungswert der Personennachfrage d^p je Quelle-Ziel-Relation und Zeitintervall

c^{veh} Fahrgastkapazität eines Fahrzeugs

Das bedeutet, dass bei entsprechend hohen Erwartungswerten der Personennachfrage von der folgenden zu erwartenden benötigten Fahrzeuglastfahrtanzahl ausgegangen werden kann:

- Im Schnitt werden so viele Fahrzeugfahrten benötigt wie sich als Quotient aus Nachfrage und Fahrzeugkapazität ergeben.
- Aufgrund von Nachfrageschwankungen kommt durchschnittlich eine halbe Fahrzeugfahrt hinzu, abzüglich der durch eine Personennachfrage von 0,5 Personenwegen belegten Fahrzeugfahrtanzahl.

Diese Berechnung bedeutet, dass durchschnittlich und mit ausreichend hoher Personennachfrage bei jeder für eine Relation generierten Ridesharing-Fahrzeuglastfahrt eine Restkapazität gleich der halben Fahrzeugkapazität abzüglich 0,5 Personenwegen zu erwarten ist. Entsprechend viele Personenwege anderer Relationen, die über übereinstimmende Zellenfolgen verfügen (vgl. Kapitel 4.2.1) könnten zusätzlich gebündelt werden.

Für geringe Nachfragewerte eignet sich die lineare Näherungsfunktion nicht. Für diesen Bereich wird vorgeschlagen, eine stetige Näherungsfunktion für die in Abbildung 13 dargestellten zeitintervallbezogenen Erwartungswerte zu verwenden. Zur Bestimmung der Zielfunktion kommen insbesondere zwei Werte zur Zeitintervallanzahl in Frage. Zum einen die Anzahl der Zeitintervalle, in die die makroskopische Nachfrage tatsächlich gleichverteilt aufgeteilt wird. Dem Anwendungsfall dieser Arbeit folgend wären dies bei einem makroskopischen Modell, das die Ergebnisse der Ziel- und Moduswahl stundenfein ausgibt, vier Zeitintervalle von je 15 Minuten. Zum anderen bietet sich die Gesamtanzahl der Zeitintervalle, in die der modellierte Tag eingeteilt wird, an. Bei Zeitintervall-dauern von 15 Minuten sind dies 96 Zeitintervalle. Bei Betrachten eines ganzen Tages wirkt die Annahme der Gleichverteilung der Personennachfrage auf alle Zeitintervalle jedoch sehr künstlich. Für hohe Werte zur Anzahl der Zeitintervalle nähert sich der Graph zur zeitintervallfeinen erwarteten Fahrzeuglastfahrtanzahl schneller der in Formel (15) dargestellten linearen Näherungsfunktion an.

4.3 Umlaufbildung

Output des Bündelungsschritts (Ridesharing) oder der Ziel- und Moduswahl (Carsharing) sind die relations- und zeitintervallfeinen Fahrzeuglastfahrten, die zum Bedienen der Personennachfrage benötigt werden. Ziel der Umlaufbildung ist es, diese Lastfahrten zu Fahrzeugumläufen zu verketteten und so benötigte Leerfahrten sowie die erforderliche Anzahl an Fahrzeugen zu bestimmen. HARTLEB ET AL. (2021) stellen eine heuristische Lösung vor, die es ermöglicht, auch nicht-ganzzahlige Fahrzeugfahrten miteinander zu verketteten. Der Fahrzeugumlauf wird dabei primär unter Verwendung möglichst weniger Fahrzeuge und in zweiter Instanz mit möglichst wenig Leerfahrkilometern erstellt. Ein wichtiger Aspekt der Methode ist, dass sie aufgrund ihrer chronologischen Vorgehensweise zwar keine optimalen Ergebnisse liefert, jedoch weitaus weniger Rechenkapazität benötigt als ein entsprechendes Optimierungsmodell. Dadurch wird sie anwendbar für große Problemgrößen, die in makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen oftmals vorliegen.

Tabelle 7 enthält eine Übersicht zur verwendeten, von HARTLEB ET AL. (2021) entwickelten Umlaufbildungsmethode.

Eingangsdaten	Verarbeitung	Ausgangsdaten und Kenngrößen
Variable Größen: <ul style="list-style-type: none"> • Räumlich und zeitlich differenzierte Lastfahrten für Relationen des jeweils ersten und letzten Halts einer Fahrt: Ganzzahlige oder nicht-ganzzahlige Nachfrage in Form zeitintervallspezifischer Quelle-Ziel-Matrizen • Fahrzeugfahrzeiten bzw. Entfernungsmatrix, die die Entfernung zwischen Verkehrszellen in Zeitintervallen angibt 	Statisch (allwissend), heuristisch	Ergebnis: <ul style="list-style-type: none"> • Räumlich und zeitlich differenzierte Leerfahrten: Ganzzahlige oder nicht-ganzzahlige Nachfrage in Form zeitintervallspezifischer Quelle-Ziel-Matrizen • Anzahl benötigter Fahrzeuge
Parameter: <ul style="list-style-type: none"> • Umlaufbildungsregeln: Max. Leerfahrtdauer 		Kenngrößen: <ul style="list-style-type: none"> • Leerfahrkilometer/-stunden

Tabelle 7: Übersicht zur makroskopischen Umlaufbildung.

HARTLEB ET AL. (2021) interpretieren das Umlaufbildungsproblem als Flussproblem, zu dessen Lösung chronologisch je Zeitintervall allen abfahrenden Lastfahrten ein Fahrzeug zugewiesen wird. Dessen Fahrtenfolge verlängert sich entsprechend. Die Fahrzeugzuweisung erfolgt je Zeitintervall entsprechend der folgenden Rangfolge (HARTLEB ET AL. (2021)):

- Zunächst werden vorzugsweise Fahrzeuge verwendet, die in der für eine Fahrzeuglastabfahrt nachgefragten Verkehrszelle verfügbar sind. Fahrzeuge können bereits in Verkehrszellen verfügbar sein, wenn eine vorherige Fahrzeuglastfahrt in dieser geendet hat.

- Nachfolgend werden verfügbare Fahrzeuge aus anderen Verkehrszellen umgesetzt. Mittels der Entfernungsmatrix wird sichergestellt, dass das Fahrzeug bereits im benötigten Abfahrtszeitintervall am Startpunkt der durch das Umsetzen erzeugten Leerfahrt zur Verfügung steht. Um Fahrzeugleerfahrtskilometer möglichst gering zu halten, werden jeweils die nächstgelegenen Fahrzeuge ausgewählt. Darüber hinaus kann die maximale Leerfahrtdauer begrenzt werden, um besonders lange Leerfahrten zu vermeiden.
- Abschließend wird für abfahrende Lastfahrten, die weder einem Fahrzeug aus derselben noch einer nahegelegenen Verkehrszelle zugeordnet werden können, ein neues Fahrzeug generiert. Dadurch erhöht sich die Gesamtanzahl benötigter Fahrzeuge.

Für eine ausführliche Erläuterung inklusive Herleitung, Beispielrechnungen und -anwendungen sei auf HARTLEB ET AL. (2021) verwiesen. Ein Anwendungstest zeigt hier unter anderem die Bedeutsamkeit der gewählten Zeitintervalldauer auf. Der Grund liegt in der Angabe der Entfernung zwischen Verkehrszellen in Zeitintervallen: Liegt die Zeitintervalldauer deutlich über der durchschnittlichen Fahrtzeit je Relation, werden diese Fahrtzeiten stark überschätzt. Folglich werden nur Lösungen mit einer ungerechtfertigt hohen Anzahl benötigter Fahrzeuge gefunden. (HARTLEB ET AL. (2021))

Der Algorithmus lässt sich sowohl für ganzzahlige als auch nicht-ganzzahlige Fahrzeuglastfahrnachfrage anwenden. Im Fall nicht-ganzzahliger Nachfrage werden die Erwartungswerte einzelner Fahrzeuglastfahrten und -leerfahrten beliebig unterteilt und zusammengeführt. So kann beispielsweise eine Fahrzeuglastfahrt mit 1,5 Fahrzeugfahrten in einer Verkehrszelle enden und anschließend für eine Fahrzeuglastfahrt von 0,9 Fahrzeugfahrten weiterverwendet werden. In diesem Fall verbleiben 0,6 Fahrzeuge in der Verkehrszelle und stehen zur anderweitigen Verwendung zur Verfügung.

Das Abschätzen des Einflusses dieser Vorgehensweise auf das Ergebnis im Vergleich zu ganzzahligen Berechnungen stellt einen Ansatz für zukünftige Forschungsarbeiten dar. Tendenziell ist eine Unterschätzung der benötigten Leerfahrten und der Fahrzeuganzahl zu erwarten, da die Annahme, dass die Fahrzeugfahrten beliebig aufgeteilt werden können, also stets genau passend auftreten, optimistisch ist. Weitere, im Ausblick von HARTLEB ET AL. (2021) genannte Anforderungen an Erweiterungen des Algorithmus sind die Implementierung unterschiedlicher Geschwindigkeiten und damit Entfernungsmatrizen für Last- und Leerfahrten, tageszeitabhängige Fahrtzeiten sowie geschlossene Umläufe. Geschlossene Umläufe sollen sicherstellen, dass zu Beginn und Ende des Betrachtungszeitraums die gleiche Anzahl an Fahrzeugen je Verkehrszelle verfügbar ist, um keine Leerfahrten zu unterschlagen.

4.4 Ganzzahliges Runden von Nachfrage

Auch wenn es gegen den makroskopischen Modellierungsgedanken spricht und damit zulasten der Abbildung der Nachfrage als Erwartungswert einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, kann es von praktischem Nutzen sein, die Sharing-Personennachfrage auf ganzzahlige Werte zu runden. Dabei gehen zwangsläufig Informationen zur räumlichen und zeitlichen Verteilung der Nachfrage verloren. Vorteile sind

- vor allem bei einer hohen Anzahl geringer relations- und zeitintervallspezifischer Nachfragewerte ein verminderter Rechenaufwand für Bündelung und Umlaufbildung,
- eine intuitivere Nachvollziehbarkeit der Bündelungsrestkapazität bzw. der Anzahl benötigter Lastfahrten und der Umlaufbildung sowie
- die Möglichkeit mikroskopische Ansätze für Bündelung und Umlaufbildung zu nutzen.

Aufgrund der hohen benötigten Rechenkapazität im Bündelungsschritt, ist das Runden von Nachfrage insbesondere für die Ridesharingmodellierung interessant.

Input des Rundungsverfahrens ist die nicht-ganzzahlige makroskopische Personennachfrage nach Sharingfahrten, wobei die zeitintervallfeine Nachfrage für Quelle-Ziel-Relationen vorliegt. Die Nachfragesituation lässt sich als dreidimensionaler Quader bzw. als übereinander gestapelte Ebenen verbildlichen (siehe Abbildung 15). Entsprechend der traditionellen Abbildung von Nachfrage in Nachfragematrizen entspricht die x-Achse den Zielverkehrszellen und die y-Achse den Quellverkehrszellen einer Relation. Die zeitliche Differenzierung der Nachfrage erfolgt entlang der z-Achse in Form der zeitintervallspezifischen Nachfragematrizen.

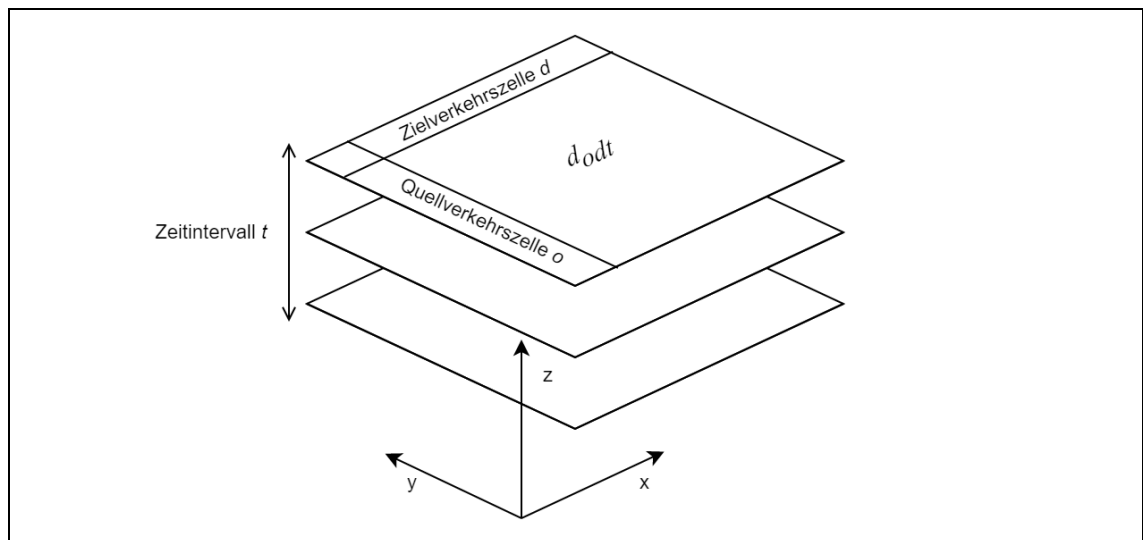


Abbildung 15: Visualisierung dreidimensionaler Nachfrage.

Besonders hervorzuhebende Anforderungen an die Methode zur Rundung der Nachfrage ergeben sich vor allem dadurch, dass die Struktur der Nachfrage möglichst gut erhalten bleiben soll, oftmals jedoch auch sehr geringe zeitintervallspezifische Nachfragewerte für einzelne Quelle-Ziel-Relationen vorliegen (vgl. Abbildung 16).

Dementsprechend sollen das Gesamtverkehrsaufkommen sowie, soweit möglich, die Randsummen in Form von Quell-, Ziel- und Zeitintervallverkehrsaufkommen eingehalten werden. Ein weiterer begrenzender Faktor ist der Rechenaufwand zur Lösung des Rundungsproblems, der auch für große Problemgrößen eines regionalen Verkehrsnachfragemodells anwendbar bleiben muss.

Aufgrund der oftmals geringen relations- und zeitintervallfeinen Nachfrage ist es unvermeidbar, dass bei Rundung viele der nur sehr schwach nachgefragten zeitintervallspezifischen Quelle-Ziel-Relationen ohne Nachfrage bleiben. Daher muss insbesondere darauf geachtet werden, dass es nicht zu systematischen Effekten kommt, die beispielsweise dazu führen können, dass Nachfrage in Schwachlastzeiten grundsätzlich unsichtbar wird.

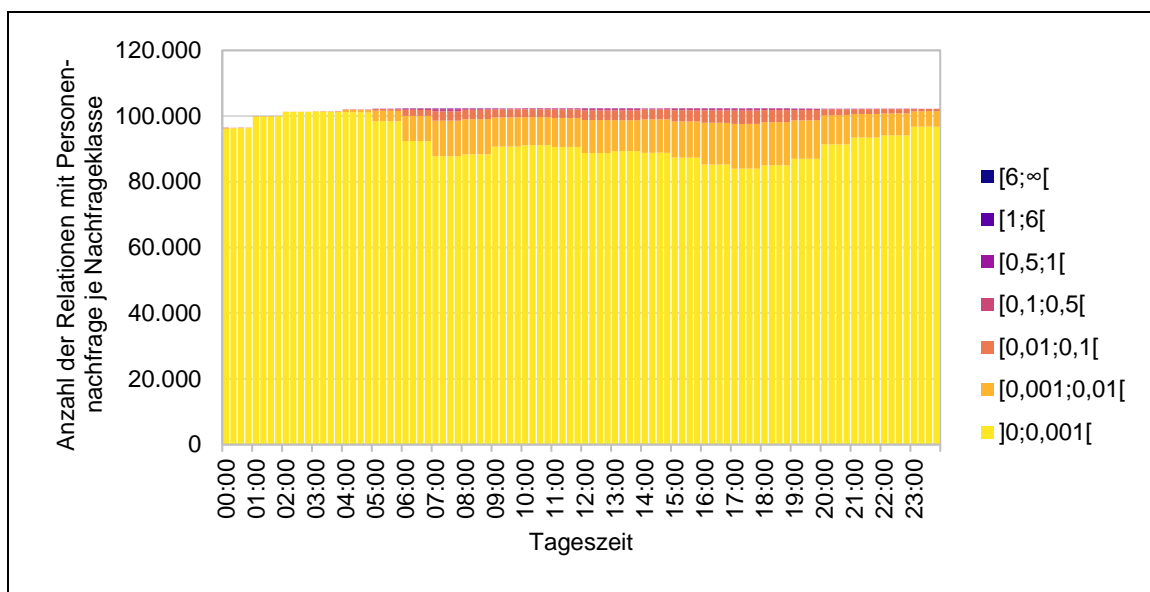


Abbildung 16: Anzahl der Relationen mit Ridesharing-Personennachfrage je Nachfrageklasse und Zeitintervall in Beispielnachfragestruktur mit geringer Nachfrage (entnommen aus Fallstudie Kapitel 7). Nachfrageklassierung nach Größe der Personennachfrage je Quelle-Ziel-Relation und Zeitintervall.

Grundsätzlich stehen diverse Rundungsregeln und -verfahren zur Verfügung, z.B. kaufmännisches, symmetrisches, zufälliges und/oder summenerhaltendes Runden. Aufgrund der beschriebenen Anforderungen wird eine Variante eines summenerhaltenden Verfahrens mit zufälligem Anteil gewählt.

Das vorgeschlagene Verfahren besteht aus zwei Rundungsschritten, die jeweils auf der Grundidee des Hare-Niemeyer-Verfahrens (siehe DER BUNDESWAHLEITER (2015)), einem Sitzzuteilungsverfahren des Deutschen Bundestags, aufbauen. Die zwei Rundungsschritte werden in Abbildung 17 unterstützend visualisiert. In Abbildung 18 und Abbildung 19 sind die Berechnungsschritte des Algorithmus in vereinfachter Schreibweise abgebildet.

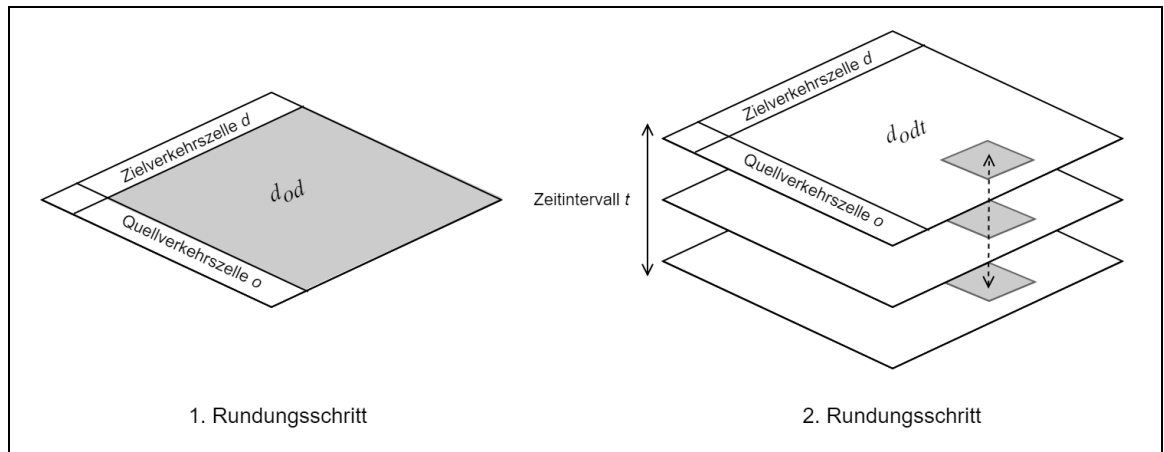


Abbildung 17: Visualisierung der Schritte zur Nachfragerundung: 1. Quelle-Ziel-Relationen der Tagesmatrix, 2. Relationsspezifische Tagesganglinie.

Im ersten Schritt (Abbildung 17 (links) und Abbildung 18) wird die makroskopische Tagesmatrix, die die Tagesnachfrage je Quelle-Ziel-Relation enthält, entsprechend dem Hare-Niemeyer-Verfahren gerundet:

- Die relationsfeine Nachfrage wird in deren ganzzahligen Anteil und den Nachfragerest aufgeteilt. Die ganzzahligen Anteile werden als gerundete Nachfrage der jeweiligen Relation übernommen.
- Die kaufmännisch gerundete Summe der Restnachfrage über alle Relationen gibt an, wie viel Personennachfrage in Form von Personenwegen noch verteilt werden kann. Diese Personenwege werden den Relationen in Reihenfolge der Reste nach deren Größe vergeben.

Durch die Anwendung des Hare-Niemeyer-Verfahrens zur Rundung der relationsfeinen Nachfrage wird die Summe der Nachfragedifferenzbeträge zwischen makroskopischer und gerundeter Nachfrage in dieser Ebene minimiert. Die Gesamtnachfrage bleibt erhalten.

Eingabe: relations- und zeitintervallspezifische makroskopische Nachfrage d_{odt}^{makro}

Ausgabe: ganzzahlig gerundete relationsspezifische Tagesnachfrage d_{od}^{int}

```

1  for  $o \in Z$  do
2    for  $d \in Z$  do
      # bestimme relationsspezifische makroskopische Tagesnachfrage
3     $d_{od}^{makro} \leftarrow \sum_{t \in T} d_{odt}^{makro}$ 
      # speichere ganzzahligen Bestandteil der Nachfrage
4     $d_{od}^{int} \leftarrow \lfloor d_{od}^{makro} \rfloor$ 
      # speichere noch nicht zugewiesenen Rest der Nachfrage
5     $d_{od}^{rest} \leftarrow d_{od}^{makro} \bmod 1$ 
      # bestimme Summe der noch nicht zugewiesenen Tagesnachfrage
6     $d^{rest} \leftarrow \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}^{rest}$ 
7    while  $d^{rest} \geq 0,5$  do
      # bestimme das  $o$ - $d$ -Paar mit der größten Restnachfrage  $d_{od}^{rest}$ 
8     $(\tilde{o}, \tilde{d}) \leftarrow \operatorname{argmax}_{o \in Z, d \in Z} d_{od}^{rest}$ 
      # erhöhe dessen gerundete Nachfrage
9     $d_{\tilde{o}\tilde{d}}^{int} \leftarrow d_{\tilde{o}\tilde{d}}^{int} + 1$ 
      # aktualisiere Differenz zu makroskopischer Nachfrage
10    $d_{\tilde{o}\tilde{d}}^{rest} \leftarrow d_{\tilde{o}\tilde{d}}^{makro} - d_{\tilde{o}\tilde{d}}^{int}$ 
      # aktualisiere noch zu verteilende Restnachfrage
11    $d^{rest} \leftarrow d^{rest} - 1$ 

```

Abbildung 18: Algorithmus zur ganzzahligen Rundung von Nachfrage: Erster Rundungsschritt auf Ebene der Tagesnachfrage.

Im zweiten Schritt (Abbildung 17 (rechts) und Abbildung 19) wird die im ersten Schritt ermittelte Tagesnachfrage je Quelle-Ziel-Relation zeitlich disaggregiert. Harte Randbedingung ist in diesem Schritt, dass die gerundete relationsfeine Nachfrage als Summe der zeitintervall- und relationsfeinen Nachfrage über alle Zeitintervalle erhalten bleibt. Darüber hinaus sollen die einzelnen Zeitintervallverkehrsaufkommen, das heißt die Tagesganglinie des Gesamtverkehrsaufkommens, möglichst gut abgebildet werden. Das Vorgehen zur Aufteilung der ganzzahligen Nachfrage je Quelle-Ziel-Relation auf die Zeitintervalle entspricht dem Vorgehen des vorigen Schritts mit einem erweiterten Kriterium zur Bildung der Reihenfolge zur Restnachfrageverteilung:

- Die zeitintervallfeine Relationsnachfrage wird in deren ganzzahligen Anteil und den Nachfragerest aufgeteilt. Die ganzzahligen Anteile werden als gerundete Nachfrage des jeweiligen Zeitintervalls übernommen.

- Die Differenz aus bereits gerundeter Tagesnachfrage der Relation aus Schritt Eins und ganzzahligem Anteil der zeitintervallfeinen Relationsnachfrage gibt an, wie viel Personennachfrage in Form von Personenwegen noch verteilt werden kann. Die verbleibenden Personenwege werden den Zeitintervallen entsprechend der im Folgenden erläuterten Reihenfolge zugeordnet.
- Das Sortierungskriterium der verwendeten Reihenfolge setzt sich aus drei Bestandteilen zusammen:
 - Der auch im ersten Schritt verwendeten Restnachfrage der nun zeitintervallspezifischen Relationsnachfrage. Je größer diese Restnachfrage ist, desto eher wird die Nachfrage dieses Zeitintervalls aufgerundet und nicht abgerundet.
 - Einem über alle Zeitintervalle normierten Rundungsfehler des aktuell betrachteten Zeitintervalls, um die Tagesganglinie der Gesamtnachfrage möglichst gut abzubilden. Je größer der Rundungsfehler des aktuellen Zeitintervalls im Vergleich zu dem aktuell größten zeitintervallbezogenen Rundungsfehler ist, desto eher wird die Nachfrage dieses Zeitintervalls aufgerundet und nicht abgerundet. Da der normierte Rundungsfehler abhängig von bereits abgeschlossenen Rundungsvorgängen ist, sollte er für jeden Rundungsschritt neu berechnet werden. Dieses Vorgehen ist jedoch zu rechenintensiv, um für große Problemgrößen praktikabel zu sein. Es wird daher ein Vorgehen implementiert, das den normierten Rundungsfehler der Zeitintervalle jeweils nach dem Runden aller Relationen einer Quellverkehrszelle aktualisiert.
 - Einer Zufallszahl zwischen Null und Eins. Je größer die Zufallszahl ist, desto weniger wahrscheinlich ist es, dass die Nachfrage des Zeitintervalls aufgerundet und nicht abgerundet wird. Durch das Hinzufügen einer zufällig gewählten Komponente kann die Tagesganglinie der Gesamtnachfrage besser abgebildet werden. In zukünftigen Arbeiten sollte untersucht werden, ob der positive Einfluss der Zufallszahl entfällt, wenn der zeitintervallbezogene normierte Rundungsfehler stets aktuell gehalten wird.

Diese drei Bestandteile bilden entsprechend der Differenz aus der Zufallszahl und den anderen beiden Komponenten in aufsteigendem Zahlenwert die Reihenfolge zur Verteilung der ganzzahligen Restnachfrage einer Relation auf die Zeitintervalle. Der normierte Rundungsfehler wird zur besseren Anpassung doppelt gewichtet.

Eingabe: relations- und zeitintervallspezifische makroskopische Nachfrage d_{odt}^{makro} ,
gerundete relationspezifische Nachfrage d_{od}^{int} aus 1. Rundungsschritt

Ausgabe: relations- und zeitintervallspezifische ganzzahlige Nachfrage d_{odt}^{int}

initialisiere alle zeitintervallspezifischen Rundungsfehler

- 1 $d_i^{delta} \leftarrow 0 \quad \forall t \in T$
- 2 **for** $o \in Z$ **do**
- 3 **for** $d \in Z$ **do**
- 4 **for** $t \in T$ **do**
 - # speichere ganzzahligen Bestandteil der Nachfrage
 - 5 $d_{odt}^{int} \leftarrow \lfloor d_{odt}^{makro} \rfloor$
 - # speichere noch nicht zugewiesenen Rest der Nachfrage
 - 6 $d_{odt}^{rest} \leftarrow d_{odt}^{makro} \bmod 1$
 - # bestimme initialen zeitintervallspezifischen Rundungsfehler
 - 7 $d_i^{delta} \leftarrow d_i^{delta} + d_{odt}^{rest}$
- # bestimme Differenz zu relationspezifischer Nachfrage d_{od}^{int} aus 1. Rundungsschritt
- 8 $d_{od}^{rest} \leftarrow d_{od}^{int} - \sum_{t \in T} d_{odt}^{int}$
- 9 **for** $o \in Z$ **do**
- 10 **for** $d \in Z$ **do**
- 11 **for** $t \in T$ **do**
 - # erstelle relations- und zeitintervallspezifische Zufallszahl zwischen 0 und 1
 - 12 $z_{odt} \leftarrow \text{Zufallszahl}[0...1]$
 - # bestimme initialen normierten Rundungsfehler des Zeitintervalls
 - 13 $r_t \leftarrow \frac{d_i^{delta}}{\max_{t' \in T} d_{it'}^{delta}}$
 - # bestimme initiales Verteilungskriterium für Restnachfrage
 - 14 $k_{odt} \leftarrow z_{odt} - d_{odt}^{rest} - 2 \cdot r_t$
 - 15 **while** $d_{od}^{rest} > 0$ **do**
 - # bestimme das Zeitintervall mit minimalem k_{odt}
 - 16 $\tilde{t} \leftarrow \operatorname{argmin}_{t' \in T} k_{odt'}$
 - # erhöhe gerundete Nachfrage
 - 17 $d_{od\tilde{t}}^{int} \leftarrow d_{od\tilde{t}}^{int} + 1$
 - # aktualisiere Differenz zu makroskopischer Nachfrage
 - 18 $d_{od\tilde{t}}^{rest} \leftarrow d_{od\tilde{t}}^{makro} - d_{od\tilde{t}}^{int}$
 - # aktualisiere noch zu verteilende Restnachfrage
 - 19 $d_{od}^{rest} \leftarrow d_{od}^{rest} - 1$
 - # aktualisiere zeitintervallspezifischen Rundungsfehler
 - 20 $d_i^{delta} \leftarrow d_i^{delta} - (d_{od\tilde{t}}^{makro} \bmod 1) + d_{od\tilde{t}}^{rest}$
 - 21 **aktualisiere** $r_{t'}$ und $k_{odt'}$ für alle $t' \in T$

Abbildung 19: Algorithmus zur ganzzahligen Rundung von Nachfrage: Zweiter Rundungsschritt auf Ebene der Zeitintervalle.

Abbildung 20 bis Abbildung 23 zeigen die Ergebnisse des vorgestellten Rundungsverfahrens für zwei Beispielnachfragesituationen. In allen drei Dimensionen wird die makroskopische Nachfragestruktur durch die gerundete Nachfrage gut wiedergegeben. Im Vergleich zu Abbildung 55 und Abbildung 56 in Anhang 1 lässt sich der positive Einfluss der Zufallszahl auf das Rundungsergebnis erkennen. Insbesondere bei den Differenzplots der geringen Beispielnachfrage (Abbildung 20 und Abbildung 21) lässt sich erkennen, dass große absolute Abweichungen der Nachfrage meist kleine relative Abweichungen aufweisen. Bei der Beispielnachfragestruktur mit hoher Nachfrage (Abbildung 22 und Abbildung 23) kommt es auf Ebene der Tagesganglinie zu hohen absoluten Abweichungen von mehr als 100 Personenwegen je Zeitintervall. Diese sind jedoch verbunden mit geringen prozentualen Abweichungen. In den nachfrageschwachen Nacht- bzw. Morgenstunden kommen jedoch auch absolute Abweichungen von etwa 50 Personenwegen mit bis zu 30 Prozent relativer Abweichung zustande. Diese vergleichsweise hohen Abweichungen in der Tagesganglinie kommen dadurch zustande, dass der Fokus des Rundungsalgorithmus vorrangig auf der guten Abbildung der Nachfragestruktur der Quelle-Ziel-Relationen liegt. Es ist daher grundsätzlich mit größeren Fehlern in der Abbildung der Tagesganglinie als auf Ebene des Quell- oder Zielverkehrs zu rechnen.

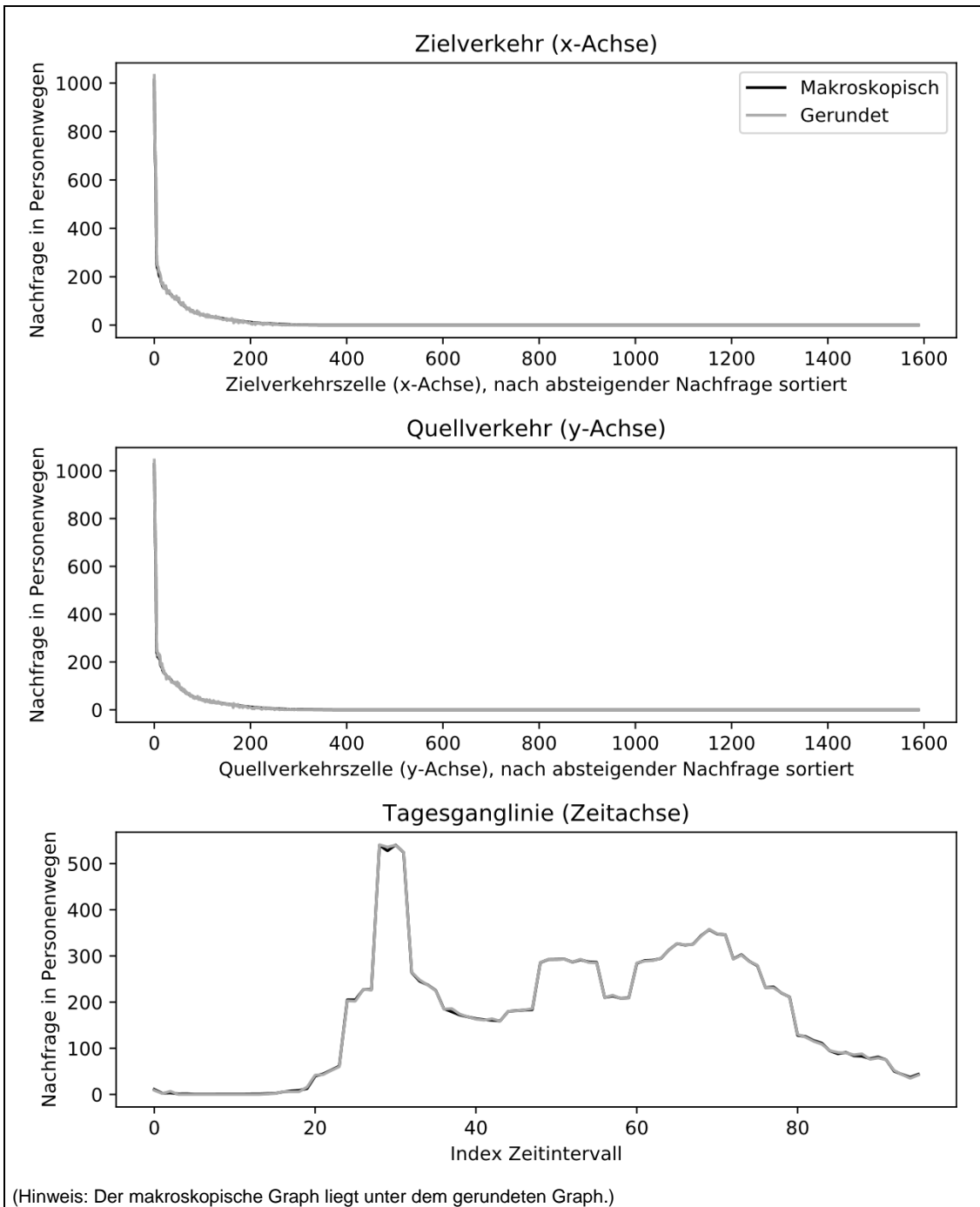


Abbildung 20: Beispielnachfragestruktur mit geringer Nachfrage (entnommen aus Fallstudie Kapitel 7) makroskopisch und gerundet. Indizierung von Quell- und Zielverkehrszelle sind nicht identisch, da jeweils nach Quell- bzw. Zielverkehrsaufkommen sortiert wurde.

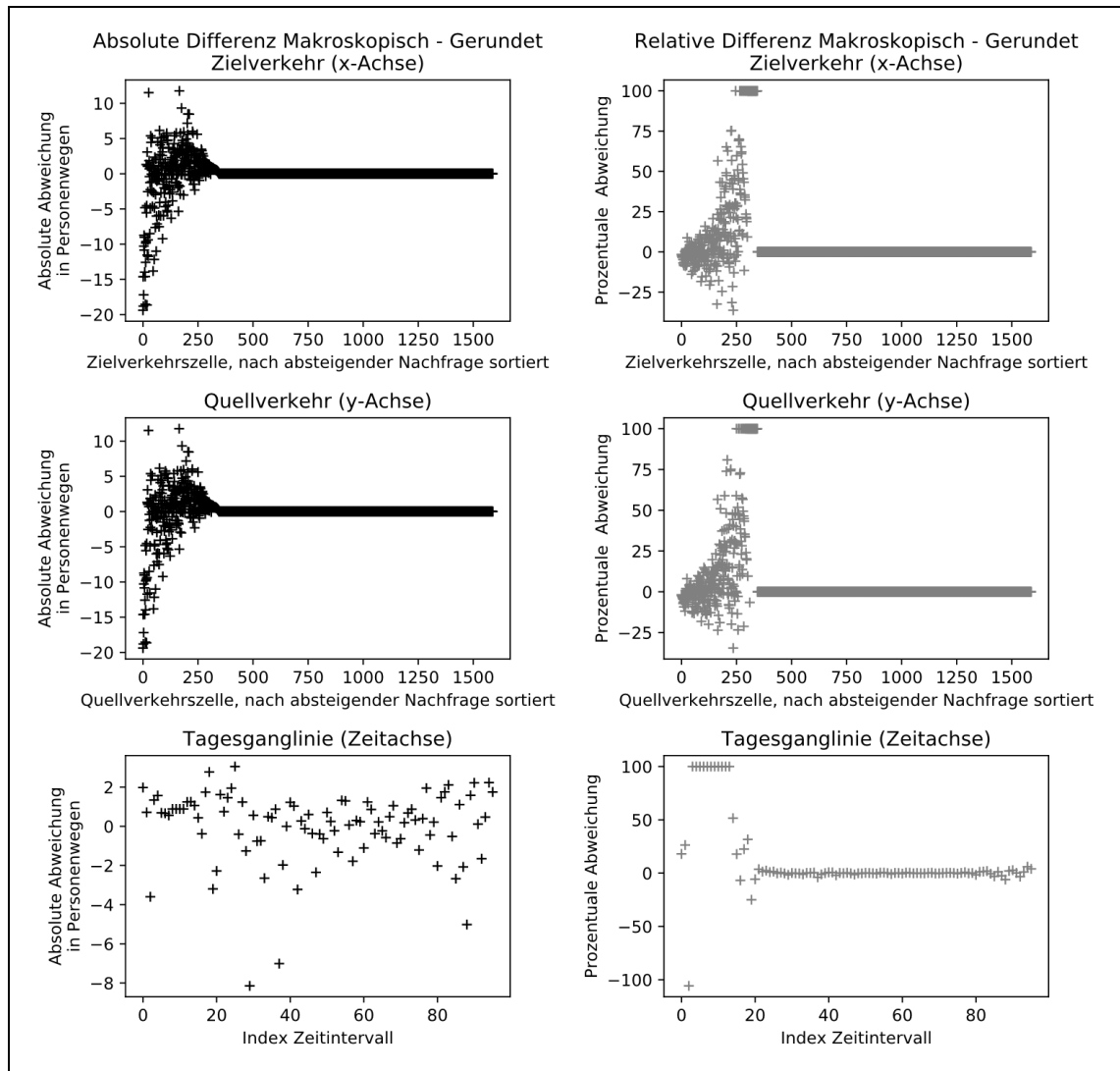


Abbildung 21: Differenzplots makroskopischer und gerundeter Nachfrage entsprechend Abbildung 20. Die Differenz der Gesamtnachfrage liegt bei weniger als einem Personenweg.

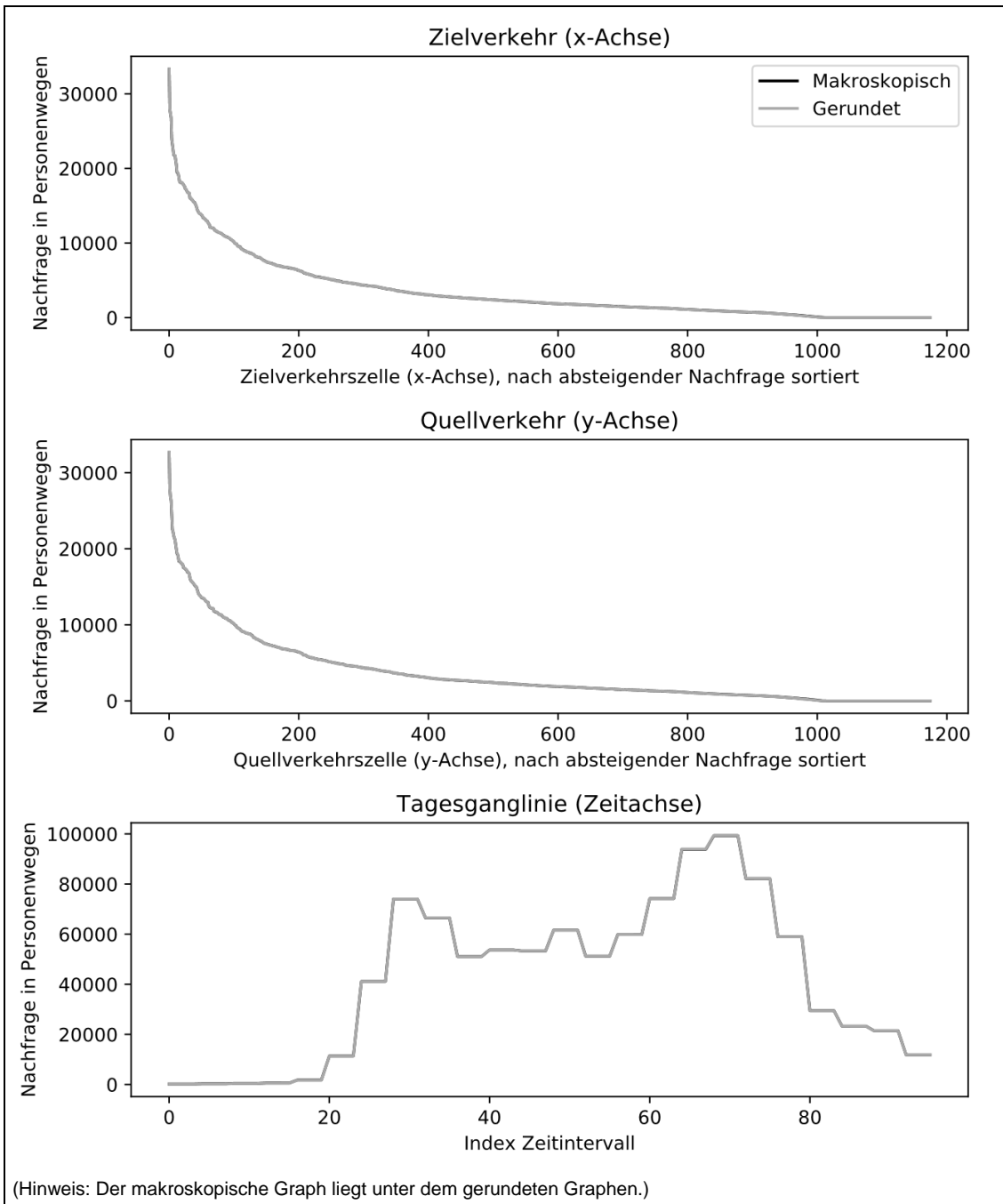


Abbildung 22: Beispielnachfragestruktur mit hoher Nachfrage makroskopisch und gerundet. Indizierung von Quell- und Zielverkehrszelle sind nicht identisch, da jeweils nach Quell- bzw. Zielverkehrsaufkommen sortiert wurde.

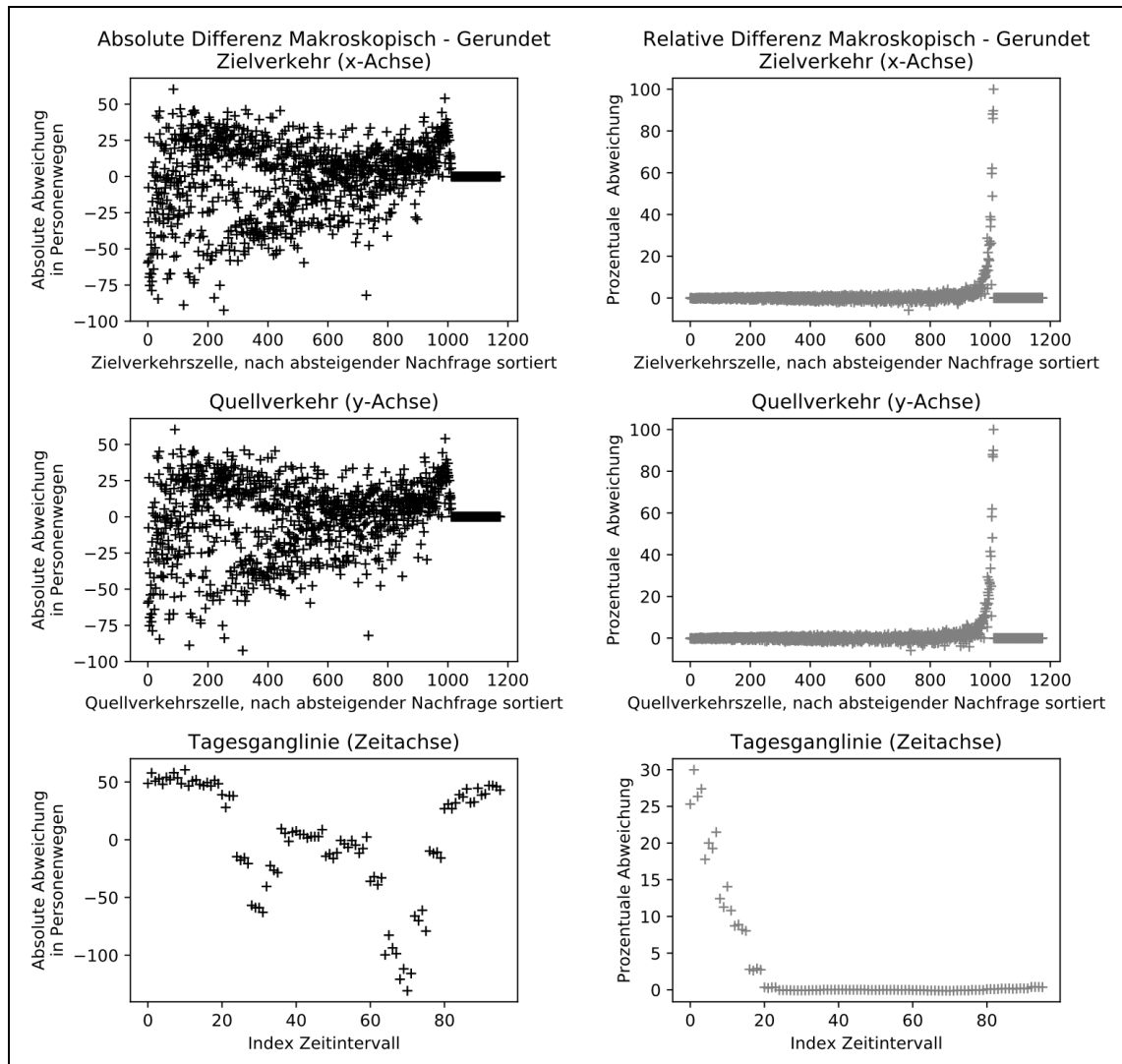


Abbildung 23: Differenzplots makroskopischer und gerundeter Nachfrage entsprechend Abbildung 22. Die Differenz der Gesamtnachfrage liegt bei weniger als einem Personenweg.

4.5 Beispielanwendung

Die vorgestellte Methode zu Bündelung und Umlaufbildung wird anhand einer Nachfragesituation näher untersucht, die dem in Kapitel 7 erläuterten Anwendungsfall für die Integration eines Ridesharingangebots in den ÖV in das makroskopische Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart entnommen ist. Nähere Informationen zu Nachfrageberechnung und Angebotsstruktur werden in Kapitel 3 und Kapitel 7 gegeben. Als beispielhafte Ridesharingnachfrage wird die Nachfrage des Szenarios S01 verwendet. Diese Nachfrage entspricht der in Abbildung 16, S. 78, Abbildung 20, S. 84 und Abbildung 21, S. 85 dargestellten Nachfrage.

4.5.1 Einfluss von Rundung, Bündelungsgrenze und räumlicher Bündelung

Eine ausführliche Betrachtung der Nachfragewirkungen erfolgt in Kapitel 7. Im Folgenden wird der Einfluss der Rundung der Ridesharingnachfrage und der Grenze zur Bündelung makroskopischer Nachfrage auf die Fahrleistung und benötigte Fahrzeuganzahl untersucht. Auf Grund der Problemgröße und der begrenzten zur Verfügung stehenden Rechenkapazität ist der Bündelungsschritt mit der vorliegenden Nachfragestruktur nicht ohne Einschränkungen berechenbar. Daher wird die Ridesharingnachfrage in den hier untersuchten Bündelungsszenarien entweder ganzzahlig gerundet oder eine Bündelungsgrenze verwendet. In den Bündelungsszenarien wird von einheitlichen Grundannahmen zu Bündelung und Umlaufbildung ausgegangen: Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen, maximaler in Kauf genommener Umweg zur Mitnahme weiterer Fahrgäste von 10 Minuten bzw. einer Verdopplung der Fahrtzeit, keine Begrenzung der Leerfahrtdauer. Die Bündelungsszenarien unterscheiden sich wie folgt:

- **Ganzzahlig:** Die zeitintervall- und relationsspezifische Ridesharingnachfrage wird vor dem Bündelungsschritt mit dem in Kapitel 4.4 erläuterten Verfahren gerundet (vgl. Abbildung 20 und Abbildung 21, S. 84 f.).
- **Bündelung $\geq 0,1$:** Die Ridesharingnachfrage wird nicht gerundet. Zeitintervall- und relationsfeine Nachfrage, die kleiner 0,1 Personenwege ist, wird nicht gebündelt. Um diese Nachfrage zu bedienen, wird von einem Besetzungsgrad der Fahrzeuglastfahrt von 1 ausgegangen. Das heißt, es wird die gleiche Anzahl an Lastfahrten benötigt wie Personennachfrage vorhanden ist.
- **Bündelung $\geq 0,01$:** Entsprechend Bündelung $\geq 0,1$. Zeitintervall- und relationsfeine Nachfrage, die kleiner 0,01 Personenwege ist, wird nicht gebündelt.

Mit der Festlegung einer Grenze zur Bündelung wird entschieden, welche Nachfrage so gering ist, dass sie für die Bündelung als nicht mehr geeignet angesehen wird, da sie zu selten auftritt. Zugleich wird die benötigte Rechenleistung durch Begrenzung der Bündelung stark reduziert, da viele Relationen im Bündelungsschritt nicht mehr betrachtet werden müssen (vgl. Abbildung 16, S. 78). Der gleiche Effekt tritt bei Rundung der Nachfrage auf.

Abbildung 24 zeigt die jeweils zum Bedienen der Personennachfrage benötigte Ridesharing-Tagesfahrleistung je Bündelungsszenario unter Verwendung der in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Bündelungsmethode mit Rampenfunktion zur Fahrzeuglastfahrtberechnung (Formel (8) und (9), S. 58). Sowohl die Fahrleistung als auch die benötigte Fahrzeuganzahl liegt im Fall einer Bündelungsgrenze von 0,1 Personenwegen deutlich höher als im ganzzahligen Bündelungsszenario. Bei einer Bündelungsgrenze von 0,01 Personenwegen tritt der umgekehrte Fall ein: Die benötigten Lastfahrkilometer liegen sehr nah an denen der ganzzahligen Berechnung, während die Leerfahrkilometer um etwa 30 Prozent zurückgehen. Es werden jedoch etwa 40 Fahrzeuge mehr benötigt als im ganzzahligen Szenario. Im Vergleich der Szenarien mit Bündelungsgrenze beträgt die

Fahrleistung bei Grenze 0,01 lediglich etwa 70 Prozent der Fahrleistung bei einer Bündelungsgrenze von 0,1 Personenwegen. Die benötigte Fahrzeuganzahl sinkt von 534 benötigten Ridesharingfahrzeugen auf nur noch 385 bei der niedrigeren Bündelungsgrenze. Damit fällt der Einfluss der Bündelungsgrenze auf das Bündelungs- und Umlaufbildungsergebnis sehr groß aus. Das Ergebnis mit Bündelungsgrenze von 0,01 Personenwegen liegt nah am ganzzahligen Ergebnis. Auffällig ist der Unterschied des Anteils der generierten Leerfahrtskilometer, der mit 17 bzw. 18 Prozent in beiden Szenarien mit Bündelungsgrenze geringer ausfällt als im ganzzahligen Szenario mit 22 Prozent.

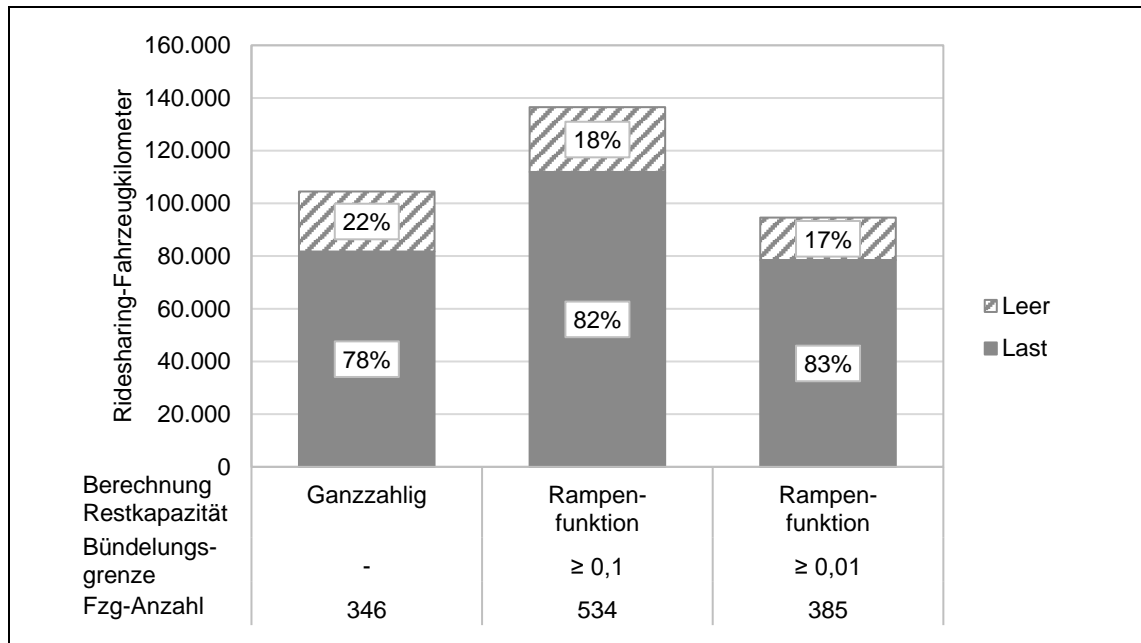


Abbildung 24: Tagesfahrleistung durch Ridesharing-Last- und -Leerfahrten sowie benötigte Flottengröße je Bündelungsszenario (Ganzzahlig/Rampenfunktion).

Die Erklärung für den großen Ergebnisunterschied zwischen den Bündelungsgrenzen von 0,1 und 0,01 Personenwegen findet sich in der relations- und zeitintervallspezifischen Nachfragestruktur des Anwendungsfalls (Abbildung 25): Etwa die Hälfte der Gesamtnachfrage kommt durch Nachfrage zustande, die weniger als 0,1 Personenwege je Relation und Zeitintervall aufweist. In der Nachfrageklasse von mindestens 0,01 Personenwegen und weniger als 0,1 Personenwegen je Relation und Zeitintervall liegt ein Drittel der Gesamtnachfrage. Das ist die Nachfrage, die im Bündelungsszenario mit Bündelungsgrenze 0,01 gebündelt wird, bei Grenze 0,1 jedoch nicht.

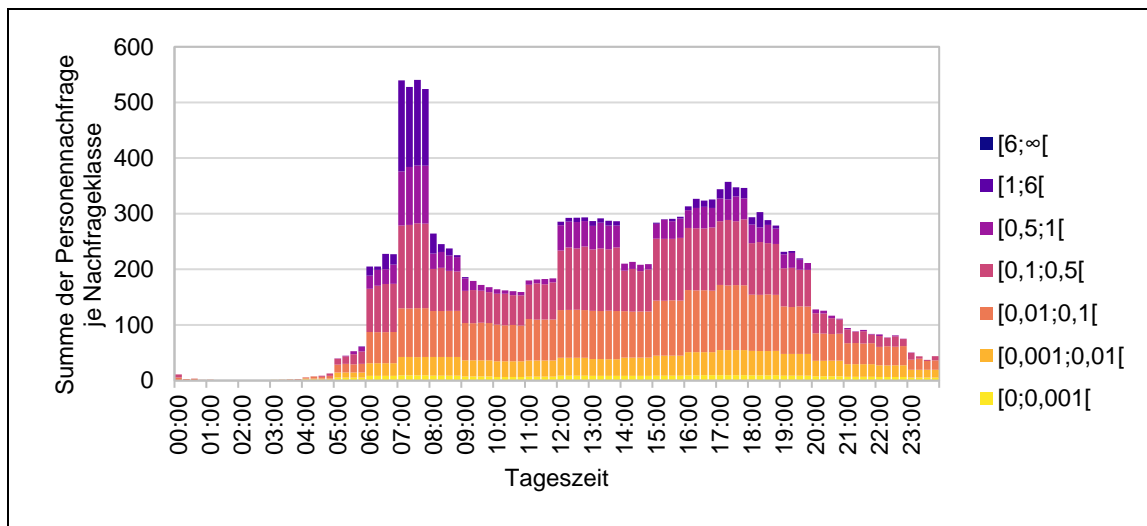


Abbildung 25: Summe der Ridesharing-Personennachfrage je Nachfrageklasse und Zeitintervall. Nachfrageklassierung nach Größe der Personennachfrage je Quelle-Ziel-Relation und Zeitintervall.

Tabelle 8 zeigt die mittlere Fahrtweite je Last- und Leerfahrt eines Ridesharingfahrzeugs in den untersuchten Bündelungsszenarien. Die mittleren Fahrtweiten je Lastfahrt liegen in allen Szenarien bei etwa 12 Kilometern je Fahrzeuglastfahrt, Umwegfahrten zur Mitnahme zusätzlicher Fahrgäste sind in diesen Werten enthalten. Auffällig sind die Unterschiede in den durchschnittlichen Fahrtweiten je Leerfahrt. Obwohl die Summe der Lastfahrtskilometer in den Szenarien mit ganzzahliger Berechnung und mit Bündelungsgrenze von 0,01 Personenwegen vergleichbar ist (Abbildung 24), werden im Szenario mit Bündelungsgrenze etwa vier Kilometer mehr je Fahrzeugleerfahrt zurückgelegt. Die Anzahl der benötigten Leerfahrten ist im Szenario mit Bündelungsgrenze von 0,01 Personenwegen mit etwa 1.300 Leerfahrten je Tag weniger als halb so hoch wie im ganzzahligen Bündelungsszenario mit etwa 2.750 Leerfahrten je Tag. Begründet ist dieser Unterschied durch die makroskopische Nachfragebetrachtung sowie den Umgang des Umlaufbildungsalgorithmus damit. Die Anzahl der benötigten Leerfahrten scheint unter vergleichbaren Nachfragestrukturen bei nicht-ganzzahliger Nachfrage deutlich niedriger auszufallen als bei ganzzahliger Nachfrage. In Bezug auf die Fahrleistung wird dieser Effekt durch eine höhere mittlere Fahrtweite wieder teilweise ausgeglichen. Ungeachtet der niedrigeren Anzahl an und Fahrleistung durch Leerfahrten im Szenario mit Bündelungsgrenze von 0,01 Personenwegen werden mehr Fahrzeuge benötigt als im ganzzahligen Szenario (vgl. Abbildung 24). Für fundiertere Aussagen sind tiefergehende Untersuchungen zum Umlaufbildungsalgorithmus nach HARTLEB ET AL. (2021) notwendig, die jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit sind.

Berechnung Restkapazität	Ganzzahlig	Rampenfunktion	Rampenfunktion
Bündelungsgrenze	-	$\geq 0,1$	$\geq 0,01$
Anzahl Fahrzeuglastfahrten	6.806 Fahrten	10.597 Fahrten	6.367 Fahrten
Anzahl Fahrzeugleerfahrten	2.763 Fahrten	2.073 Fahrten	1.280 Fahrten
Ø Fahrtweite je Lastfahrt	12,0 km/Fahrt	11,9 km/Fahrt	12,6 km/Fahrt
Ø Fahrtweite je Leerfahrt	8,2 km/Fahrt	10,6 km/Fahrt	12,3 km/Fahrt

Tabelle 8: Anzahl Fahrzeuglast- und -leerfahrten im Betrachtungszeitraum von einem Tag sowie mittlere Fahrtweite je Last- und Leerfahrt eines Ride-sharingfahrzeugs je Bündelungsszenario (Ganzzahlig/Rampenfunktion).

Bei der Betrachtung der je Zeitintervall abfahrenden Fahrzeuglastfahrten (Abbildung 26) lässt sich die gleiche Tendenz wie bei Betrachtung der Tagesfahrleistung (Abbildung 24) und Anzahl Lastfahrten je Tag (Tabelle 8) erkennen. Die benötigte Lastfahrtanzahl im Bündelungsszenario mit Bündelungsgrenze 0,01 liegt je Zeitintervall überwiegend niedriger als im ganzzahligen Szenario. Eine Ausnahme bildet die Morgenspitze zwischen 07:00 Uhr und 08:00 Uhr. Der Verlauf der benötigten Fahrzeuglastfahrten liegt im Bündelungsgrad je Zeitintervall, definiert als Quotient aus Nachfrage in Personenwegen und benötigten Fahrzeuglastfahrten, begründet (Abbildung 27): Nachfragewerte kleiner der Bündelungsgrenze führen jeweils zu einem Bündelungsgrad von Eins (ein Personenweg je Fahrzeuglastfahrt). Je größer der Anteil der nicht gebündelten Nachfrage je Zeitintervall ist, desto näher liegt der Bündelungsgrad an Eins.

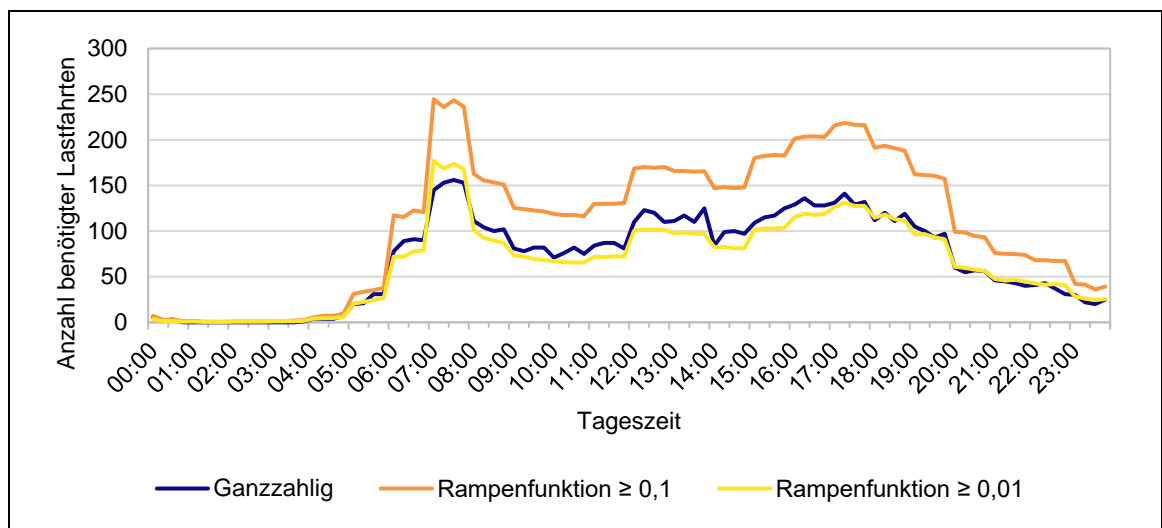


Abbildung 26: Anzahl der benötigten Lastfahrten je Zeitintervall und Bündelungsszenario (Ganzzahlig/Rampenfunktion).

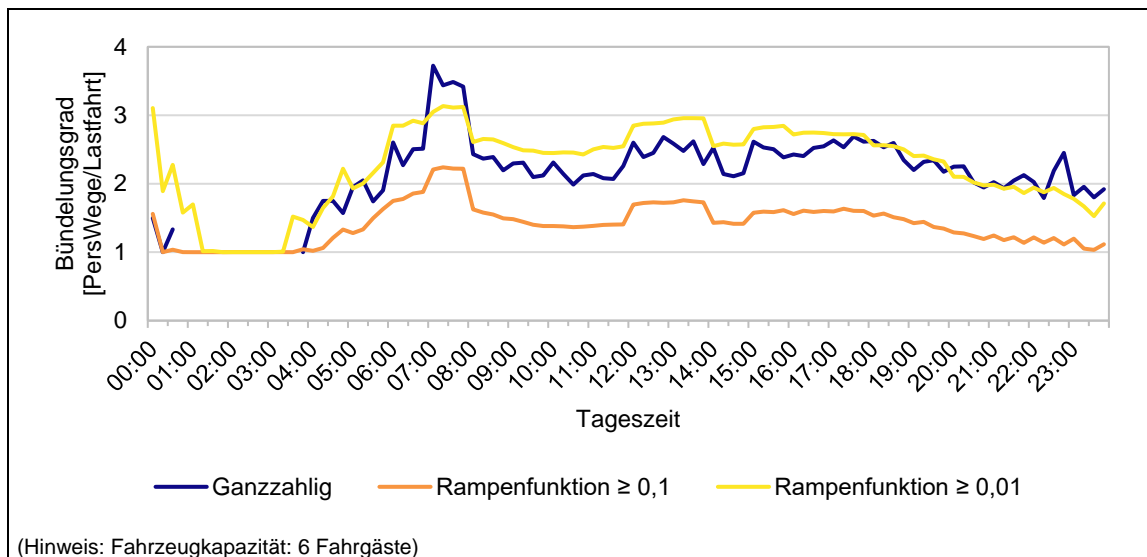


Abbildung 27: Bündelungsgrad (Quotient aus Personenwegen und Fahrzeuglastfahrten) je Zeitintervall und Bündelungsszenario (Ganzzahlig/Rampenfunktion).

Entsprechend der Erläuterungen aus Kapitel 4.2.3 und 4.2.4 ist bei Vergleich der erwarteten Lastfahrtanzahl nach mikroskopischer und makroskopischer Berechnung (vgl. Abbildung 13, S. 71) bei niedrigen Nachfragewerten tendenziell mit einer gleich großen oder höheren Fahrzeugfahrtanzahl im Makroskopischen zu rechnen. Dementsprechend ist die, wenn auch geringe, Reduktion benötigter Fahrzeuglastfahrten im Szenario mit einer Bündelungsgrenze von 0,01 Personenwegen gegenüber dem ganzzahligen Szenario unerwartet. Eine Erklärung für diesen Effekt liegt darin, dass in den dem Vergleich aus Kapitel 4.2.3 und 4.2.4 zugrundeliegenden Berechnungen die räumliche Verteilung der Personennachfrage und damit auch die räumliche Bündelung übereinstimmender Nachfragerouten nicht berücksichtigt wird. Es wird dort lediglich die benötigte Anzahl von Fahrzeuglastfahrten für genau eine Relation bestimmt. Das folgende Rechenbeispiel (siehe auch Abbildung 28) illustriert den unter Umständen sehr großen Einfluss der räumlichen Bündelung und der Restkapazität generierter Fahrzeuglastfahrten. Es wird die Methodik nach Kapitel 4.2.1 samt Rampenfunktion entsprechend Formel (8), S. 58 verwendet.

Als makroskopische Nachfrage liegt auf 10 nah beieinander liegenden und somit räumlich bündelbaren Relationen benachbarter Quell- und Zielverkehrszellen in 5 Zeitintervallen je eine Personennachfrage von 0,02 Personenwegen vor. Die Gesamtnachfrage über alle Relationen und Zeitintervalle beträgt somit 1,0 Personenwege. Entsprechend dem verwendeten Bündelungsalgorithmus können je Zeitintervall 0,2 Personenwege räumlich gebündelt werden. Dabei bestimmt der jeweils längste Weg die Fahrzeugfahrtanzahl und die damit verbundene Restkapazität zur Mitnahme weiterer Fahrgäste. Der längste Weg weist bei einer angenommenen Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen eine Kapazität von 0,02 multipliziert mit 6, also 0,12 Fahrgästen auf. Es verbleiben somit 0,08 Personenwege, die noch nicht gebündelt werden konnten und daher eine weitere

Fahrzeuglastfahrt auf dem nächstlängsten Weg generieren. Folglich werden bei einer Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen je Zeitintervall 0,04 Fahrzeuglastfahrten mit einer Gesamtkapazität von 0,24 Fahrgästen benötigt. Über alle 5 Zeitintervalle werden in Summe also 0,2 Fahrzeugfahrten benötigt, um 1,0 Personenwege zu bedienen.

Bei Runden der Nachfrage auf ganzzahlige Werte, wird die Gesamtnachfrage von 1,0 Personenwegen genau einer Relation und einem Zeitintervall zugeordnet. Dementsprechend werden auf der Relation in diesem Zeitintervall 1,0 Fahrzeuglastfahrten benötigt. Die Summe über alle 5 Zeitintervalle (davon 4 ohne Nachfrage) beträgt ebenfalls 1,0 Fahrzeugfahrten, um die Gesamtnachfrage von 1,0 Personenwegen zu bedienen, und liegt damit um ein Vielfaches höher als der makroskopische Vergleichswert von 0,2 Fahrzeuglastfahrten.

Besonders in Verkehrsnachfragemodellen mit kleinen Verkehrszellen und geringer Nachfrage ist mit diesem Effekt auf die berechnete Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten zu rechnen. Um spezifischere Aussagen zu treffen, sind vertiefende Untersuchungen nötig.

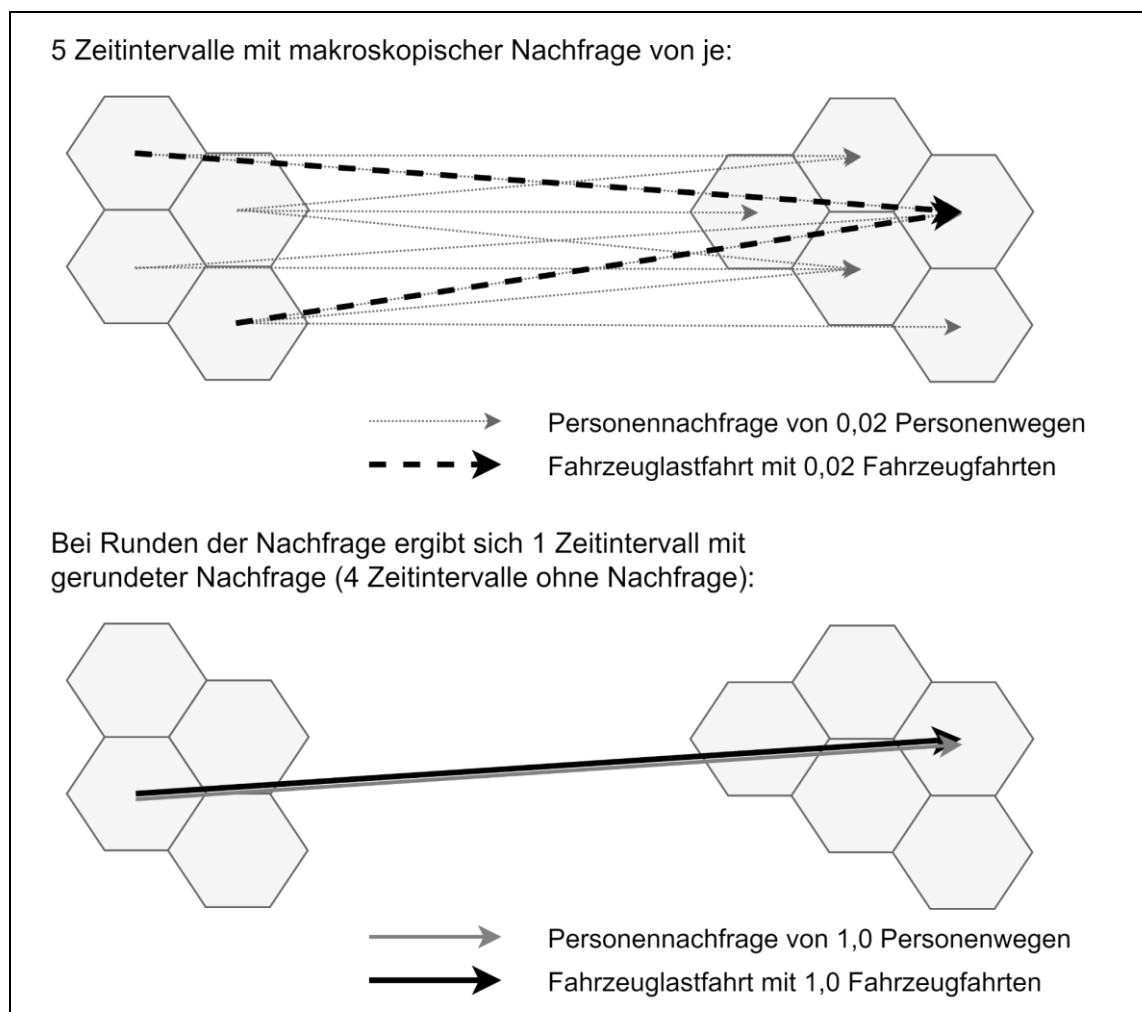


Abbildung 28: Illustration des Rechenbeispiels zum Einfluss räumlicher Bündelung bei der Rundung von Nachfrage.

4.5.2 Alternativer Ansatz zur Restkapazitätsberechnung

In Kapitel 4.2.4 wurde ein zur Rampenfunktion (Formel (8), S. 58) alternativer Ansatz zur Berechnung der benötigten Fahrzeuglastfahrten und damit auch der Restkapazität zur Fahrtenbündelung vorgeschlagen. In diesem Kapitel wird dieser Ansatz beispielhaft angewandt und mit den Ergebnissen des vorangehenden Kapitels 4.5.1 verglichen.

Um den Ansatz anzuwenden muss zunächst eine den Graphen aus Abbildung 13, S. 71 nachempfundene stetige Funktion gefunden werden. Wie in Formel (15), S. 74 dargestellt, nähern sich die Graphen bei steigender Personennachfrage einer Geraden an. Der gesamte Verlauf scheint jedoch einer Art gedämpfter Schwingung um diese Gerade zu ähneln, sodass der gesamte Funktionsverlauf entsprechend Formel (16) dargestellt werden kann. Gesucht ist nun der nichtlineare Anteil $f(d_{odtr}^p)$ des Erwartungswerts der benötigten Fahrzeugfahrten. Dieser ist abhängig von der Zeitintervallanzahl, auf der die Mittelwertbildung der Fahrzeuglastfahrten beruht, sowie der Fahrzeugkapazität.

Grundlage zur Schätzung bilden die Differenzwerte von Erwartungswerten zur Fahrzeuglastfahrtanzahl in 0,25-Personennachfrage-Schritten von 0 bis 255 Personenwegen zu Ergebnissen der Näherungsgraden. Es wird von einer Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen sowie einer Zeitintervallanzahl von 4 ausgegangen, da die Aufteilung der Personennachfrage im Beispielnachfragemodell stundenfein vorliegt und gleichverteilt auf vier 15-Minuten-Zeitintervalle aufgeteilt wird (vgl. Kapitel 3.2 und 3.3). Zur Schätzung wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Als Funktionsform wird die einer gedämpften Schwingung vorgegeben.

Die gefundene Funktionsform ist in Formel (17) dargestellt und weist ein Bestimmtheitsmaß von 0,98871 auf. Es wurde besonderer Wert auf eine möglichst gute Abbildung um den Punkt für Personennachfrage Null gelegt, dennoch führt die angepasste Funktion nicht durch den Punkt (0;0), sondern gibt eine Fahrzeuglastfahrtanzahl von etwa 0,023 für eine Personennachfrage von Null aus. Durch die Anwendung im Bündelungsalgorithmus werden dennoch keine Fahrzeuglastfahrten erzeugt, wenn keine Personennachfrage besteht. Der Punkt (0;0) wird somit erzwungen, folglich ist bei der nächstgrößeren Nachfrage mit einem Sprung der Ergebnisse zu rechnen. Der dadurch entstehende Fehler wird als ausreichend gering eingeschätzt.

$$d_{odtr}^{veh,o} = \frac{d_{odtr}^p}{c^{veh}} + 0,5 - \frac{0,5}{c^{veh}} + f(d_{odtr}^p) \quad (16)$$

Schätzung für $n_T = 4$ und $c^{veh} = 6$:

$$f(d_{odtr}^p) = -0,6256 \cdot \cos(1,0043 \cdot d_{odtr}^p + 0,8893) \cdot \exp(-0,6682 \cdot d_{odtr}^p) \quad (17)$$

mit

$d_{odtr}^{veh,o}$ Erwartungswert benötigter Fahrzeuglastfahrten $d^{veh,o}$ der Relation von o nach d im Zeitintervall t auf Route r

d_{odtr}^p Erwartungswert der Personennachfrage d^p der Relation von o nach d im Zeitintervall t auf Route r

c^{veh} Fahrgastkapazität eines Fahrzeugs

$f(d_{odtr}^p)$ Nichtlinearer Anteil des Erwartungswerts benötigter Fahrzeuglastfahrten in Abhängigkeit der erwarteten Personennachfrage

n_T Anzahl der Zeitintervalle, auf die die Nachfrage bei zugrundeliegender ganzzahliger Berechnung aufgeteilt wird (vgl. Kapitel 4.2.2 und 4.2.4)

Abbildung 29 bildet die zugrundeliegenden Erwartungswerte sowie die gefundene angepasste Funktion in Kombination mit Formel (16) ab. Zu Vergleichszwecken ist auch der Funktionsgraph der Rampenfunktion (Formel (8), S. 58) abgebildet. Abbildung 30 zeigt die Abweichung der angepassten Funktion zu den zugrundeliegenden Erwartungswerten. Es lässt sich zusätzlich zur Abweichung bei einer Personennachfrage von Null erkennen, dass die Funktionsform noch nicht optimal gewählt wurde. Es besteht Verbesserungspotenzial zur Anpassung der Funktion an die Erwartungswerte, für erste Tests ist das Ergebnis jedoch ausreichend präzise.

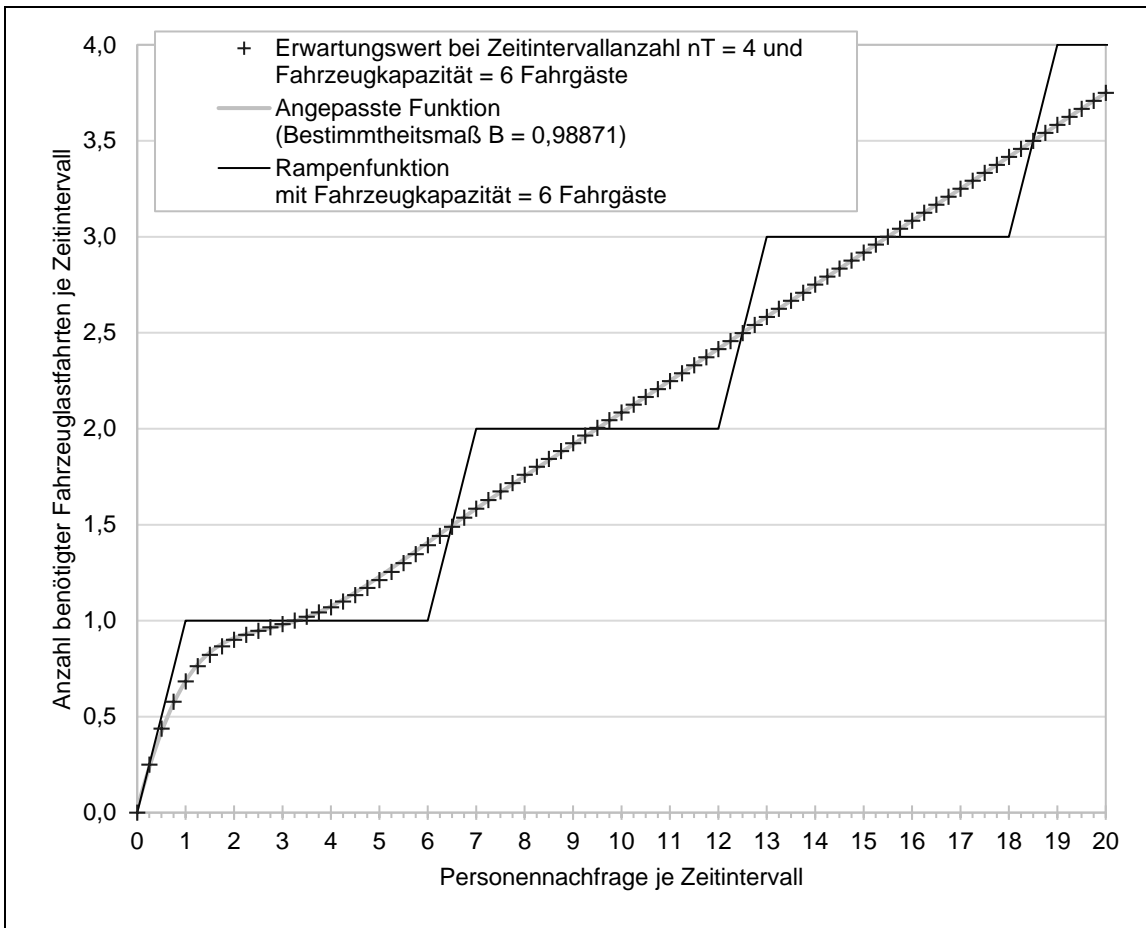


Abbildung 29: Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten in Abhängigkeit der Personennachfrage je Zeitintervall (Angepasste Funktion für alternativen Berechnungsansatz sowie zugrundeliegende Erwartungswerte und Rampenfunktion).

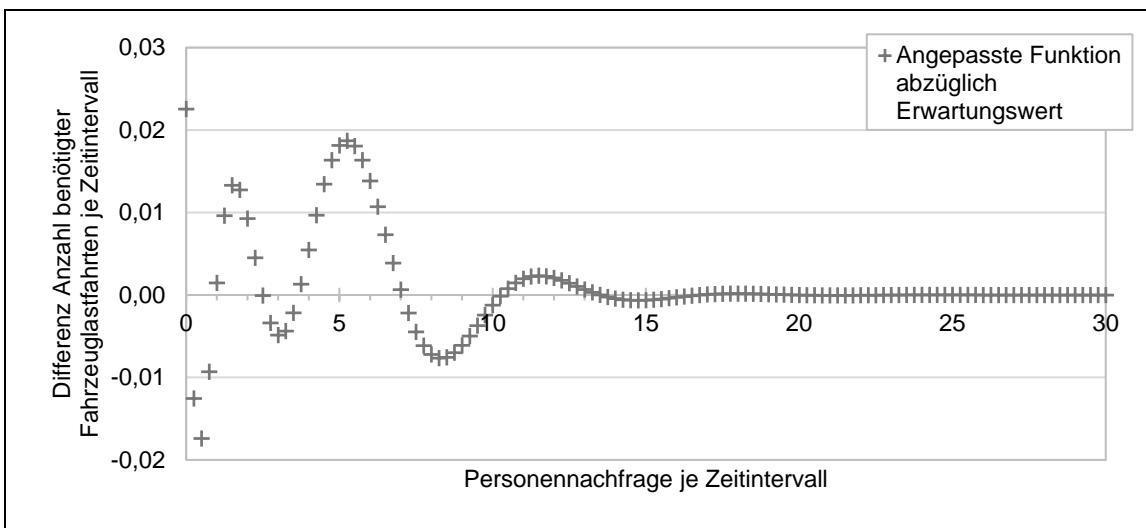


Abbildung 30: Abweichung der Funktionswerte der angepassten Funktion des alternativen Ansatzes zu zugrundeliegenden Erwartungswerten entsprechend Abbildung 29.

Die Anwendung des alternativen Ansatzes mit der angepassten Funktion zur Fahrzeuglastfahrtermittlung erfolgt unter den gleichen Rahmenbedingungen wie die in Kapitel 4.5.1 beschriebenen Bündelungsszenarien. Die Bündelungskapazität wird entsprechend Formel (9), S. 58 als Produkt aus Fahrzeuglastfahrtanzahl und Fahrzeugkapazität berechnet.

Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen die Ergebnisse der Fahrtenbündelung und Umlaufbildung für die gegebene Beispielnachfrage in Bezug auf Fahrleistung bzw. Fahrzeuglastfahrten je Zeitintervall. Zum Vergleich sind die Ergebnisse der Bündelungsszenarien des voranstehenden Kapitels 4.5.1 ergänzt. Zum einen zeigt sich, dass der Einfluss der Wahl der Bündelungsgrenze in dieser Nachfragestruktur sehr viel höher ausfällt als der der Berechnungsweise zur Fahrzeuglastfahrtanzahl. Zum anderen lässt sich erkennen, dass die mit dem alternativen Berechnungsansatz erzielten Ergebnisse denen der Rampenfunktion sehr ähnlich sind. Auch in Bezug auf Fahrzeuglast- und -leerfahrtanzahl sowie die zugehörigen Fahrzeugkilometer zeigt sich ein der Berechnung mit Rampenfunktion jeweils sehr ähnliches Bild. Dies kann damit begründet werden, dass ein Großteil der Nachfrage durch Nachfragewerte kleiner 0,5 Personenwegen gebildet wird (vgl. Abbildung 25, S. 90). In diesem Bereich weisen die beiden Funktionen einen sehr ähnlichen Verlauf auf (vgl. Abbildung 29).

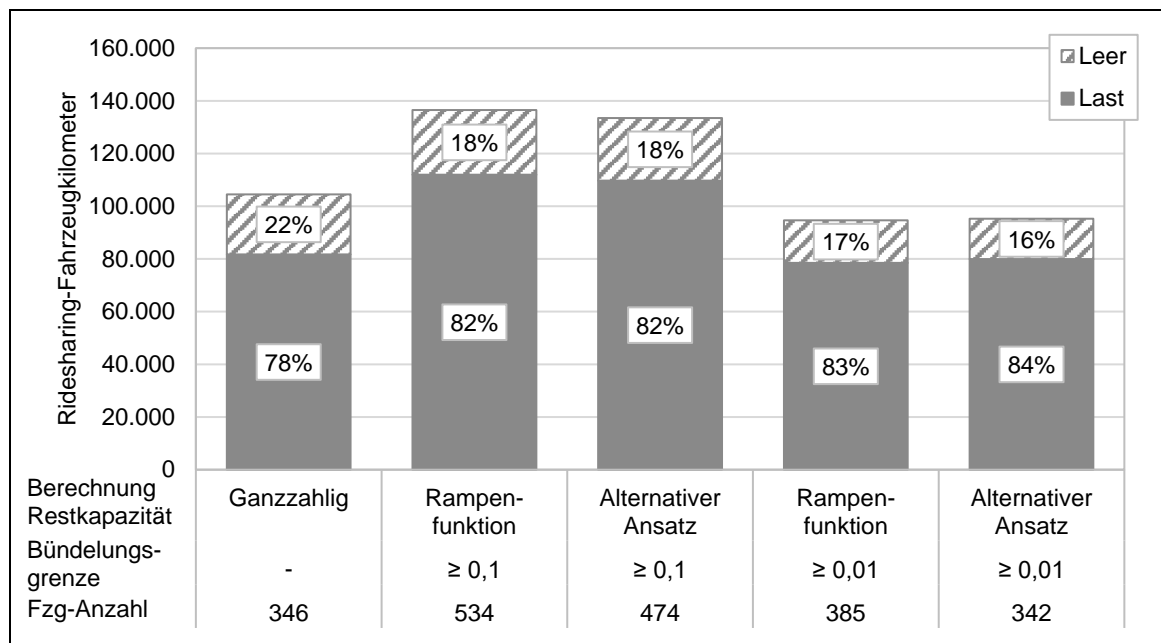


Abbildung 31: Tagesfahrleistung durch Ridesharing-Last- und -Leerfahrten sowie benötigte Flottengröße je Bündelungsszenario (Ganzzahlig/Rampenfunktion/Alternative Berechnung).

Bei Betrachtung der Tagesganglinie der Lastfahrten (Abbildung 32) ist auffällig, dass die Werte der alternativen Berechnung in der morgendlichen Spitzenstunde näher an denen der ganzzahligen Berechnung liegen als die der Rampenfunktion. In diesen Zeitintervallen treten vergleichsweise viele Personennachfragewerte größer Eins und auch größer

Sechs auf (Abbildung 25, S. 90). In diesem Bereich unterscheiden sich die beiden Funktionsverläufe (Abbildung 29) deutlicher.

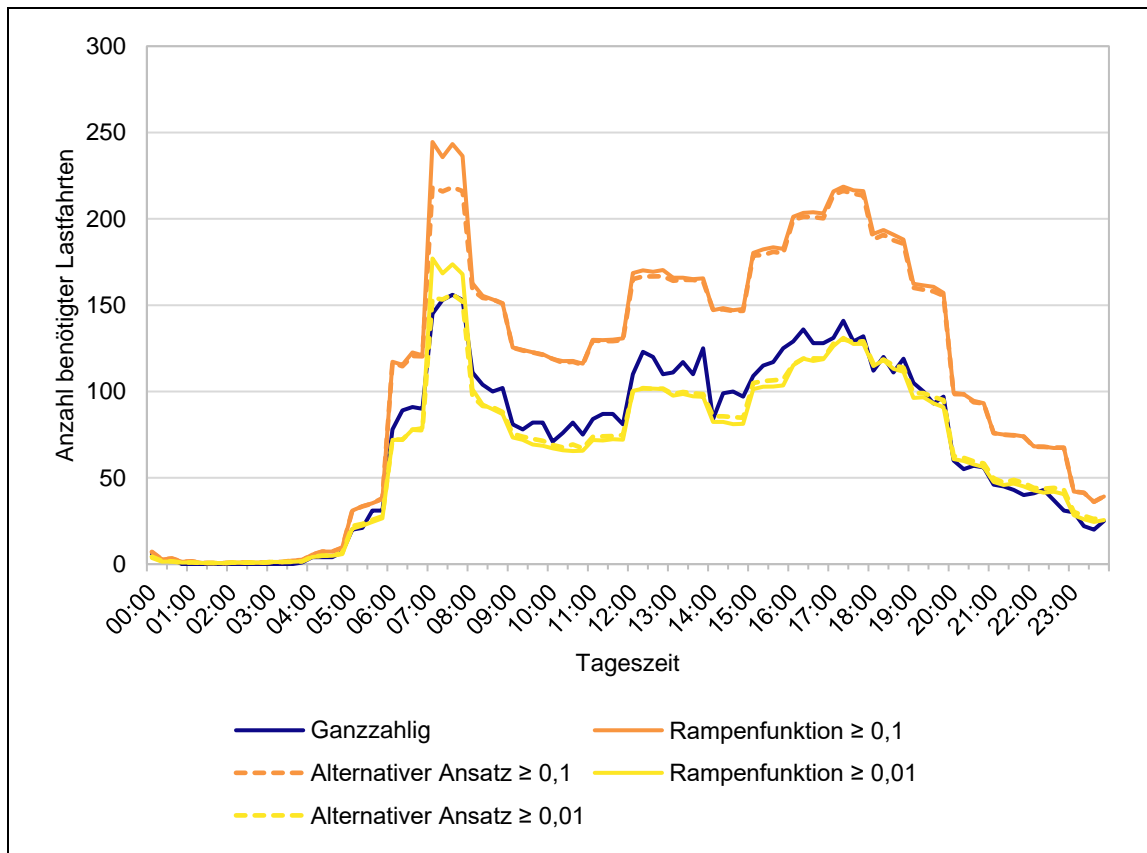


Abbildung 32: Anzahl der benötigten Lastfahrten je Zeitintervall und Bündelungsszenario (Ganzzahlig/Rampenfunktion/Alternative Berechnung).

Diese Ergebnisse können ein Hinweis darauf sein, dass die alternative Berechnung zur Fahrzeuglastfahrtanzahl zu Ergebnissen führt, die näher an einem mikroskopischen Ergebnis liegen. Um belastbare Aussagen zu treffen, ist es jedoch nötig weitere Tests, insbesondere auch mit variierenden Nachfragesituationen durchzuführen. Zumindest bei der vorliegenden Nachfragestruktur fällt der Einfluss der Bündelungsgrenze bedeutend höher aus als der der verwendeten Berechnungsfunktion zur Lastfahrtanzahl.

4.6 Zwischenfazit und Bewertung

In Bezug auf die Integration in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle sind für die betrieblichen Entscheidungsprozesse bei Sharingangeboten insbesondere zwei Schritte von hoher Relevanz für den Algorithmus zur Nachfrageberechnung: die Bündelung von Personennachfrage zu Lastfahrten und die Umlaufbildung der Fahrzeuge. Andere, nicht nachfrageabhängige betriebliche Festlegungen können außerhalb des Iterationsprozesses der Nachfrageberechnung integriert werden. Bündelung und Umlaufbildung jedoch

müssen in den Berechnungsalgorithmus einbezogen werden. Die vorgestellten Verfahren für diese Schritte bieten eine praktikable Lösung, die in bestehenden makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen mit ganzzahliger oder auch nicht-ganzzahliger Nachfrage angewendet werden kann. Beide Schritte weisen jedoch in Bezug auf Herleitung und Rechenkapazität noch offene Fragen und Forschungsbedarf auf. Im Rahmen der Untersuchungen dieses Kapitels zur Abbildung von Bündelung und Umlaufbildung lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen.

Der vorgestellten Bündelungsmethode liegt in der Fahrzeugfahrberechnung eine Rampenfunktion zugrunde. Im Vergleich mit Ergebniswerten ganzzahliger Nachfragevariationen zeigt sich, dass es bei besonders geringen Nachfragewerten von weniger als einer Personenfahrt makroskopisch im Mittel zu einer höheren Anzahl benötigter Fahrzeuglastfahrten kommt. Somit liegt die makroskopische Lastfahrberechnung vor allem in aufgrund geringer Nachfrage problematischen Gebieten und/oder Zeitintervallen auf der planerisch sicheren Seite. Bei steigender Nachfrage gleichen sich Bereiche der Unter- und Überschätzung durch den makroskopischen Ansatz aus. Die Nachbildung der Erwartungswerte ganzzahliger Nachfragevariationen als stetige Funktion stellt einen neuen, zur Rampenfunktion alternativen Ansatz zur nicht-ganzzahligen Fahrzeuglastfahrberechnung dar. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass diese Betrachtungen die räumliche Verteilung der Nachfrage und damit den räumlichen Bündelungseffekt nicht berücksichtigen. Wie die Beispielanwendung im Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart zeigt, kann bei entsprechender räumlicher Verteilung der Nachfrage makroskopisch auch ein höherer Bündelungsgrad erreicht werden als bei einer vergleichbaren ganzzahligen Nachfragestruktur.

Die Leerfahrten sowie die Anzahl benötigter Fahrzeuge werden im Schritt der Umlaufbildung bestimmt. In der Beispielanwendung führen die Szenarien mit nicht-ganzzahliger Nachfrage im Vergleich zum Szenario mit ganzzahliger Nachfrage bei ähnlichen Fahrzeuglastfahrtskilometern tendenziell zu weniger Leerfahrten und weniger Leerfahrtskilometern. Die Anzahl benötigter Fahrzeuge liegt im Gegensatz dazu höher oder ähnlich hoch wie im ganzzahligen Szenario. Eine vergleichende Abschätzung für verschiedene Nachfragestrukturen sowie ein Vergleich nicht-ganzzahliger und ganzzahliger Berechnungsweisen stellt einen Ansatz für zukünftige Arbeiten dar.

Es wurden zwei Methoden, das Runden von Nachfrage und das Festlegen eines Bündelungsgrenzwerts, vorgestellt, die dem Ziel dienen, die mit nicht-ganzzahliger und häufig sehr geringer Personennachfrage einhergehenden Problematiken zu umgehen. Das betrifft insbesondere den im Bündelungsschritt sehr hohen Rechenaufwand bei Nachfragestrukturen mit einer hohen Anzahl je Zeitintervall nachgefragter Relationen.

Der vorgestellte Rundungsalgorithmus gibt die dreidimensionale Nachfragestruktur (Quelle, Ziel, Zeitintervall) auch im Ganzzahligen gut wieder. Auch bei sehr gut angepassten ganzzahligen Nachfragestrukturen muss jedoch stets beachtet werden, dass die makroskopisch als Wahrscheinlichkeit dargestellte Nachfrage eines wiederkehrenden mittleren Tags durch eine spezifische Nachfrage eines bestimmten Tags ersetzt

wird. Dadurch gehen Informationen verloren. Vorteil der ganzzahligen Rundung ist, dass der Bündelungsschritt intuitiv besser nachvollziehbar ist.

In Bezug auf eine Bündelungsgrenze zeigt die Beispielanwendung, dass für jeden Anwendungsfall des Bündelungsalgorithmus eine Sensitivitätsanalyse und Betrachtung der Nachfragestruktur nach Nachfragegrößeklassen erfolgen muss, um eine geeignete Bündelungsgrenze festzulegen. Außerdem kann eine planerische Festlegung mit plausibler Begründung nach dem Prinzip „Ab wann ist Personennachfrage so gering, dass sie nicht mehr gut mit anderen gebündelt werden kann?“ erfolgen. Auf jeden Fall ist aber der unter Umständen sehr große Einfluss der Festlegung der Bündelungsgrenze auf das Ergebnis und nicht nur auf die benötigte Rechenleistung zu berücksichtigen. Vorteil der Bündelungsgrenze gegenüber der Rundung ist, dass Nachfrage unterhalb der Grenze zwar nicht mehr gebündelt wird, aber dennoch weiterhin sichtbar bleibt.

In Bezug auf den durch Ridesharing erzielten Besetzungsgrad wurde insbesondere der Einfluss der im Modell festgelegten Zeitintervalldauer untersucht. Im Bündelungsschritt wird dadurch die maximale Fahrgastwartezeit festgelegt, in der Umlaufbildung ist eine nicht zu hohe Zeitintervalldauer zu wählen, da ansonsten Fahrtzeiten stark überschätzt werden können. Unter planerischen Gesichtspunkten ist insbesondere die Betrachtung des Einflusses der maximalen Wartezeit auf den durchschnittlichen Besetzungsgrad interessant, da hier der Zusammenhang zwischen Besetzungsgrad, maximaler Wartezeit und Gesamtnachfrage im Betrachtungszeitraum dargestellt wird. Zum einen streben Betreiber einen Mindestbesetzungsgrad an, um rentabel agieren zu können (z.B.: Im Mittel können 3 Fahrgäste pro Fahrzeug mit einer Kapazität von 6 Fahrgästen erwartet werden, wenn eine maximale Wartezeit von 10 Minuten garantiert wird und eine Gesamtnachfrage von 18 Fahrtwünschen je Stunde vorliegt.). Zum anderen sollte auch aus Umweltaspekten ein höherer Besetzungsgrad als beispielsweise der jetzige privater Pkw angestrebt werden, um Ridesharing anzubieten (z.B.: Im Mittel können mehr als 1,3 Fahrgäste pro Fahrzeug mit einer Kapazität von 6 Fahrgästen erwartet werden, wenn eine maximale Wartezeit von 10 Minuten und eine Gesamtnachfrage von 5 Fahrtwünschen je Stunde vorliegt.). Ridesharing ist somit insbesondere dort und dann erfolgversprechend, wenn eine hohe räumlich und zeitlich gebündelte Nachfrage besteht.

5 Erweiterung der Moduswahl

In der Moduswahl werden mittels eines diskreten Wahlmodells je Quelle-Ziel-Relation Auswahlwahrscheinlichkeiten für alle verfügbaren Modi berechnet. Die Auswahlwahrscheinlichkeiten sind abhängig von den mittels Nutzenfunktionen berechneten personen(gruppen)spezifischen Nutzen je Modus und Quelle-Ziel-Relation. In typischen Verkehrsnachfragemodellen werden die Modi Fuß, Rad, Pkw und ÖV abgebildet, teilweise unterteilt in Pkw-Selbstfahrende (d.h. als fahrende Person) und Pkw-Mitfahrende. Als diskretes Wahlmodell wird überwiegend das Multinominale Logit Modell (MNL) verwendet (vgl. Kapitel 2.1.1). Im Folgenden wird darauf eingegangen, was im Schritt der Moduswahl bei Integration eines Sharingangebots in ein solches vorhandenes Modell zu beachten ist. Darüber hinaus wird eine Beispielerhebung durchgeführt, die einen Einblick in die Vorgehensweise zum Erstellen eines Moduswahlmodells unter Berücksichtigung von Sharingangeboten gibt.

5.1 Anforderungen an die Modellierungsmethode

In Abhängigkeit davon, ob das zu implementierende Sharingangebot als Teil des ÖV oder in Konkurrenz dazu angeboten werden soll (vgl. Abbildung 2, S. 37), hat dessen Integration Auswirkungen auf die zur Verfügung stehende Menge an Moduswahlalternativen oder lediglich auf die Nutzenfunktionen des Modus ÖV.

Wird Ride- oder Carsharing als Teil des ÖV angeboten, stellt das eine Erweiterung der Verkehrsmittelwahl im ÖV dar und es ist keine Erweiterung der Menge der in der Moduswahl verfügbaren Alternativen nötig. Auf die notwendigen Schritte zu dieser Anpassung des ÖV-Angebots wird in Kapitel 6 näher eingegangen. In Bezug auf die Moduswahl sind Änderungen in der Nutzenfunktion bei Kenngrößen und Parametern zu berücksichtigen. Steht das zu integrierende Sharingangebot in Konkurrenz zum ÖV, muss das diskrete Wahlmodell um eine Alternative mitsamt Nutzenfunktion ergänzt werden.

Kenngrößen, die als Attributwerte in die Nutzenfunktion der Sharingangebote eingehen, sind zum Teil nachfrageabhängig. Aus diesem Grund muss abgewogen werden, ob die rechenintensive Fahrtenbündelung und Umlaufbildung der Sharingfahrzeuge in den Iterationsprozess von Angebot und Nachfrage eingebunden wird oder nicht. Zu den nachfrageabhängigen Attributen zählt insbesondere die Fahrtzeit im Fahrzeug, da Fahrtzeiten mittels Capacity-Restraint-Funktionen in Abhängigkeit der Verkehrsstärke je Iterationsschritt berechnet werden.

Während Kenngrößen von Nutzenfunktionen im Verkehrsnachfragemodell berechnet werden, sind deren zugehörige Parameter Eingangsgrößen der Modellerstellung. Sie bilden den Einfluss der Änderung eines Attributwerts um eine Einheit auf die Änderung des Nutzens der Alternative ab. Wahlmodelle bewerten Nutzendifferenzen und es ist daher nicht möglich, absolute Parameterwerte für Sharingangebote eines anderen Modells oder aus der Literatur zu übernehmen, um sie mit den Parametern der im

bestehenden Verkehrsnachfragemodell vorhandenen Nutzenfunktionen anderer Modi zu kombinieren. Während die absoluten Werte nicht aus der Literatur übernommen werden können, liefert das Verhältnis, in dem Parameter verschiedener Kenngrößen zueinander stehen, zumindest Vergleichswerte. Einen besonderen Stellenwert nehmen dabei Zeitwertsätze ein. Ebenso kann der Literatur entnommen werden, welche Attribute in anderen Studien einen signifikanten Einfluss haben, welche Attribute generische und welche alternativenspezifische Parameter aufweisen.

Es ist zu beachten, dass die Parameterwerte aus der Literatur jeweils Ergebnisse einer Modellschätzung darstellen, die auf Grundlage einer Erhebung durchgeführt wurde. Die Vergleichbarkeit dieser der Modellschätzung und Erhebung zugrunde liegenden Stichprobe mit der im zu erweiternden Modell abgebildeten Bevölkerung begrenzt die Übertragbarkeit von Ergebnissen. Insbesondere die alternativenspezifische Konstante ist kaum aus fremden Studien übertragbar, da sie den mittleren Einfluss der unbeobachteten Faktoren auf die Nutzendifferenzen der Alternativen darstellt.

Werden nicht nur die Nutzenfunktionen eines bestehenden Modus angepasst oder um sharingspezifische Kenngrößen erweitert, sondern ein neuer Modus zur Menge der verfügbaren Wahlalternativen hinzugefügt, muss das Moduswahlmodell um das neue Sharingangebot erweitert werden. Die Eigenschaften des MNL besagen, dass alle Wahlalternativen in ihren unbeobachteten Eigenschaften voneinander unabhängig sind. Der IIA-Eigenschaft folgend verlieren bei Einführung des neuen Sharing-Modus alle bereits vorhandenen Modi prozentual gleich viel Nachfrage. Da Sharingangebote Aspekte des privaten Pkw und des ÖV in sich vereinen, scheint dieser Effekt unrealistisch und ein Vergleich mit dem zugrundeliegenden Analyse- oder Basisfall ohne Sharingangebote ist problematisch. Mögliche Lösungen für dieses Problem stellen Nested Logit (NL) oder Cross Nested Logit (CNL) Modelle dar, die im Vergleich mit dem MNL jedoch komplexer sind (vgl. Kapitel 2.1.1). Um die Modelle zu erstellen und konsistente Parametersets zu erhalten, bedarf es jeweils der Schätzung dieser Wahlmodelle.

Es ist insgesamt kaum möglich, ein bestehendes Modell um einen neuen Sharing-Modus zu erweitern, ohne eine geeignete Erhebung durchzuführen. Dies gilt insbesondere, wenn das Sharingangebot nicht Teil eines bestehenden Modus wie dem ÖV sein soll. Der Einfluss der in diesem Fall zwingenderweise getroffenen Annahmen ist so groß und schwer abzuschätzen, dass die Aussagekraft der Ergebnisse gemindert wird. Auch Literaturanalysen bereits veröffentlichter Modellschätzungen lassen sich nur begrenzt verwenden, um ein anderes Modell zu erweitern. SOTEROPOULOS ET AL. (2019) folgern beispielsweise aus ihrer Literaturanalyse, dass Änderungen in Zeitwertsätzen einen deutlich höheren Einfluss auf die Modellergebnisse haben als Kapazitäts- oder Kostenanpassungen. Wie auch bei der ursprünglichen Modellerstellung ist somit eine auf das Modell zugeschnittene Erhebung mitsamt Modellschätzung nötig, um Sharingangebote zu integrieren.

5.2 Beispielhafte Erhebung und Modellschätzung

Da es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist, eine Umfrage durchzuführen, die vom Umfang der Fragen und der Teilnehmendenzahl ausreichend ist, um eine Grundlage für die Anpassung des Verkehrsnachfragemodells der Region Stuttgart zu bilden, wird eine beispielhafte Erhebung und Moduswahlmodellschätzung durchgeführt. Sie orientiert sich am Aufbau der Moduswahl im bestehenden Verkehrsnachfragemodell und untersucht die Einflussfaktoren auf eine Moduswahl, die um direktes Ridesharing erweitert wird, das in Konkurrenz zum klassischen ÖV steht.

5.2.1 Umfragedesign

Es wird eine Stated Preference Befragung durchgeführt, die an die im Verkehrsnachfragemodell des Verband Region Stuttgart (VRS-Modell) vorhandenen Nutzenfunktionen und Modi angelehnt ist. Um die Unterteilung in gleiche Personengruppen erzielen zu können, werden die erfassten demographischen Merkmale den im VRS-Modell vorhandenen Personengruppen angepasst. Kernstück der Befragung stellen zehn Entscheidungssituationen dar, in denen die Befragungsteilnehmenden je eine von drei zur Wahl stehenden Alternativen wählen müssen. Die Wahlmöglichkeit wird auf drei Alternativen je Entscheidungssituation begrenzt, um die Teilnehmenden nicht zu überfordern und die Abbrecherquote gering zu halten. Eine Verringerung der Anzahl an Entscheidungssituationen ist nur schwer realisierbar, da bis zu fünf Modi (Fuß, Fahrrad, ÖV, Ridesharing und privater Pkw) miteinander verglichen werden müssen. Die Eigenschaften der Alternativen sind den Nutzenfunktionen des VRS-Modells entnommen. Für Ridesharing wurden die aus dem ÖV übertragbaren Eigenschaften übernommen und um die Eigenschaft „Automatisierung“ ergänzt, um zu untersuchen inwiefern fahrerloses Fahren die Entscheidungen beeinflusst. Abbildung 33 zeigt beispielhaft den Screenshot einer Entscheidungssituation.

Entscheidungssituation 6 von 10

Für alle Entscheidungssituationen gilt: Gehen Sie davon aus, dass es bewölkt bei mittlerer Temperatur und ohne Niederschlag ist. Gehen Sie davon aus, dass es keine Einschränkungen durch die Pandemie gibt. Behalten Sie Ihren Referenzweg im Hinterkopf.

Ihnen stehen die folgenden drei Alternativen zur Wahl. Welche würden Sie wählen?

	Öffentliche Verkehrsmittel	Ridepooling	Pkw
Gesamtzeit	35 min	20 min	16 min
Fahrt- bzw. Gehzeit	20 min	15 min	15 min
Zu- und Abgangszeit	5 min	5 min	1 min
Wartezeit	10 min	0 min	---
Umsteigehäufigkeit	0 x Umst.	---	---
Kosten	2 Euro	3 Euro	3 Euro
Automatisierung	---	mit Fahrer	---
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

(Hinweis: In der Umfrage wurde statt der Bezeichnung „Ridesharing“ die Bezeichnung „Ridepooling“ verwendet.)

Abbildung 33: Screenshot einer Entscheidungssituation der Erhebung.

Der größte Nachteil einer Stated Preference Befragung liegt in ihrer begrenzten Realitätsnähe. Um dem entgegenzuwirken, werden die Teilnehmenden zu Beginn der Befragung gebeten, einen Referenzweg zu wählen, den sie regelmäßig mit dem Pkw, ÖV oder Fahrrad zurücklegen. Dieser Referenzweg soll bei den nachfolgenden Entscheidungssituationen im Hinterkopf behalten werden. Zu Fuß zurückgelegte Wege sollen nicht als Referenzweg dienen, da diese Wege in vielen Fällen sehr kurz sind und Ridesharing in wenigen Fällen eine sinnvolle Alternative darstellen würde. Anhand der Länge des Referenzwegs (kurz, mittel oder lang; für quantitative Einteilung siehe Anhang 2) und der Pkw-Verfügbarkeit der teilnehmenden Person wird eines von sechs Fragensets ausgewählt. Die im ausgewählten Fragenset enthaltenen Entscheidungssituationen berücksichtigen zum einen, dass in der längsten Referenzwegkategorie (Fahrtzeit länger 25 Minuten im Pkw, länger 20 Minuten in Bus oder Bahn oder länger 50 Minuten mit dem Fahrrad) kein Modus Fuß und generell bei fehlender Pkw-Verfügbarkeit kein Modus Pkw angeboten wird. Die Entscheidungssituationen weisen ebenfalls in Abhängigkeit der Referenzwegkategorie nach Fahrdauer im Schnitt kürzere oder längere Fahrtzeiten auf. Dadurch wird der Referenzweg nicht genau nachgebildet, den Umfrageteilnehmenden die Vorstellung aber etwas erleichtert. Tabelle 9 zeigt die Struktur der durchgeführten Erhebung. Die vollständige Erhebung ist in Anhang 2 abgebildet.

Willkommenstext	<ul style="list-style-type: none"> • Hintergrund und Motivation, Umfragestruktur, Ergebnisverwendung, Kontakt
Referenzweg	<ul style="list-style-type: none"> • Wegezzweck: Arbeit, Schule/Uni/Ausbildungsstätte, Sport/Freizeit, Einkaufen, Sonstiges • Modus: Pkw, ÖV, Fahrrad • Fahrtzeit im Fahrzeug
Pkw-Verfügbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Pkw-Verfügbarkeit: Ja, Nein
Erläuterung Ridesharing und Entscheidungssituationen	<ul style="list-style-type: none"> • Ridesharing: Kleinbus mit bis zu sechs Fahrgästen, taxiähnlicher Dienst, Haltepunkt meist wenige Gehminuten von Quelle/Ziel, unter Umständen Umwege für Mitnahme weiterer Fahrgäste • Entscheidungssituationen: Aufbau, Moduswahlalternativen, Eigenschaften
Zehn Entscheidungssituationen	<ul style="list-style-type: none"> • Hintergrund: Referenzweg, Wetter (mittlere Temperatur, ohne Niederschlag), keine Pandemie • Fragenset je nach Referenzweg: Auswahl aus sechs Fragensets nach Kombination mit/ohne Pkw-Verfügbarkeit und Referenzweglänge kurz/mittel/lang • Wahl aus jeweils drei Moduswahlalternativen: Fuß, Fahrrad, ÖV, Ridesharing, privater Pkw • Eigenschaften der Alternativen: Gesamtzeit (alle Modi), Fahrt- bzw. Gehzeit (alle Modi), Zu- und Abgangszeit (Fahrrad, ÖV, Ridesharing, Pkw), Wartezeit (ÖV, Ridesharing), Umsteigehäufigkeit (ÖV), Kosten (ÖV, Ridesharing, Pkw), Automatisierung (Ridesharing)
Soziodemographische Merkmale	<ul style="list-style-type: none"> • Alter, Geschlecht, Einwohnerzahl Wohnort, Tätigkeit, Bildungsabschluss
Endnachricht	<ul style="list-style-type: none"> • Freifeld für Kommentare, Kontakt

Tabelle 9: Struktur der Erhebung.

Um auch bei geringer Teilnehmendenzahl möglichst signifikante Ergebnisse der Parameterschätzung zu erreichen, wird ein effizientes Umfragedesign erstellt. Für genauere Erläuterungen zum Konzept effizienter Umfragedesigns siehe beispielsweise HENSHER ET AL. (2005) oder ROSE UND BLIEMER (2009). Unter Angabe von erwarteten Nutzenfunktionen je Modus, Mengen möglicher Attributausprägungen sowie der Festlegung von Rahmenbedingungen wie beispielsweise, dass Ridesharing mindestens so viel kosten soll wie der ÖV, werden Alternativen- und Attributkombinationen generiert, die das Schätzen der Parameter begünstigen. Insbesondere Gewichtungparameter von Attributen mit einem vergleichsweise geringen Einfluss auf den Gesamtnutzen sind schwer zu schätzen und führen dazu, dass viele Entscheidungssituationen ausgewertet werden müssen.

Neben dem Hinweis, den zu Beginn der Befragung durch die Teilnehmenden benannten Referenzweg bei den Moduswahlentscheidungen im Hinterkopf zu behalten, wird zudem angegeben, dass von bewölktem Wetter bei mittlerer Temperatur ohne Niederschlag auszugehen ist, um nicht einschätzbare Annahmen vonseiten der Teilnehmenden einzugrenzen. Des Weiteren ist die Reihenfolge der angezeigten Alternativen stets zufällig gewählt, um die Bevorzugung immer des gleichen Modus aufgrund seiner Anordnung zu vermeiden.

5.2.2 Stichprobe

Die Umfrage wurde als Online-Befragung durchgeführt, wobei die Verteilung überwiegend über private Kontakte und einen verkehrsplanerisch geprägten Newsletter erfolgte. Entsprechend ist die Stichprobe geprägt und repräsentiert nicht den Durchschnitt der Einwohner Deutschlands oder der Region Stuttgart.

Insgesamt haben 250 Personen mindestens die Startseite der Umfrage betrachtet, 185 haben die Umfrage vollständig bearbeitet, 187 Teilnehmende haben alle Entscheidungssituationen beantwortet. Diese 187 Fragebögen bilden die Grundlage der folgenden Auswertungen. Insgesamt haben an der Umfrage mehr Männer (56 Prozent) als Frauen (43 Prozent) teilgenommen (1 Prozent ohne Angabe). Die am stärksten vertretenen Altersgruppen liegen bei 18 bis 29 sowie 30 bis 39 Jahren (vgl. Abbildung 34). Wie in Abbildung 35 dargestellt, wohnt die Mehrheit der Umfrageteilnehmenden in Großstädten, etwa 40 Prozent aller Teilnehmenden in Städten mit mehr als 500.000 Einwohnern. Insbesondere unter diesen Personen ist, wie Abbildung 35 zeigt, die Pkw-Verfügbarkeit niedrig. Die Pkw-Verfügbarkeit sinkt mit zunehmender Einwohneranzahl des Wohnorts. Insgesamt steht 63 Prozent der Befragten ein Pkw zur Verfügung.

Der Bildungsgrad der Teilnehmenden ist sehr hoch. Nahezu 80 Prozent der Befragten geben als höchsten Bildungsabschluss einen Abschluss an einer Hochschule an, etwa 15 Prozent einen Gymnasialabschluss. Die am häufigsten vertretene Tätigkeitsgruppe unter den Teilnehmenden ist Erwerbstätigkeit in Vollzeit (60 Prozent). Es folgen Studium (21 Prozent), Erwerbstätigkeit in Teilzeit (10 Prozent) und Rente (6 Prozent). Zudem ist jeweils eine Person (jeweils etwa 0,5 Prozent der Gesamtteilnehmenden) den Gruppen Ohne Erwerbstätigkeit, Schule, Ausbildung und ohne Angabe zuzuordnen.

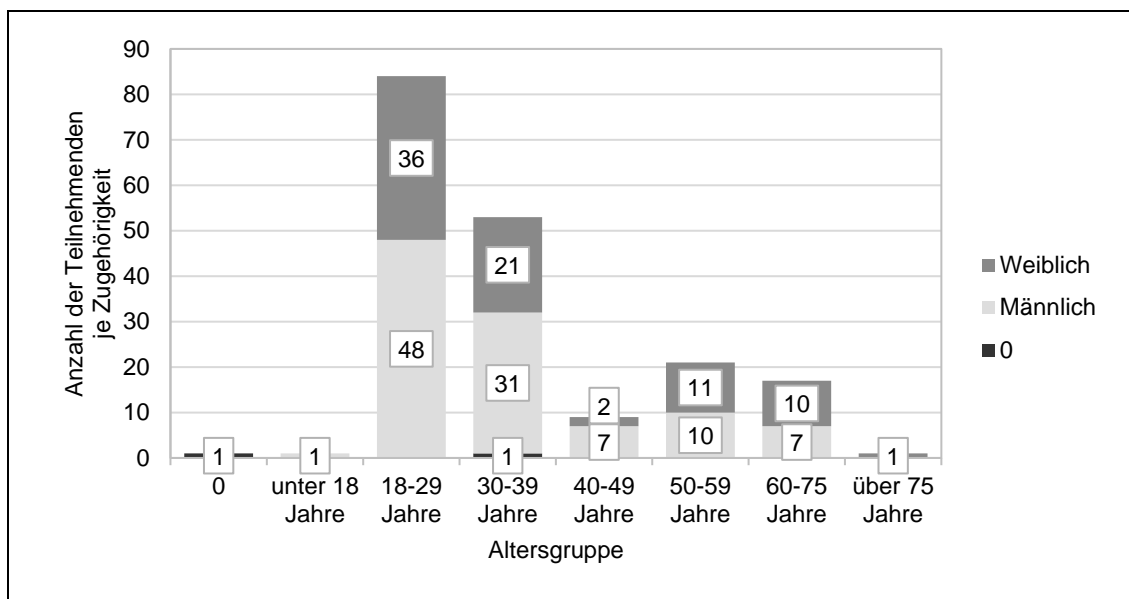


Abbildung 34: Stichprobenverteilung nach Geschlecht und Alter (Kategorie 0 entspricht keiner Angabe). n = 187.

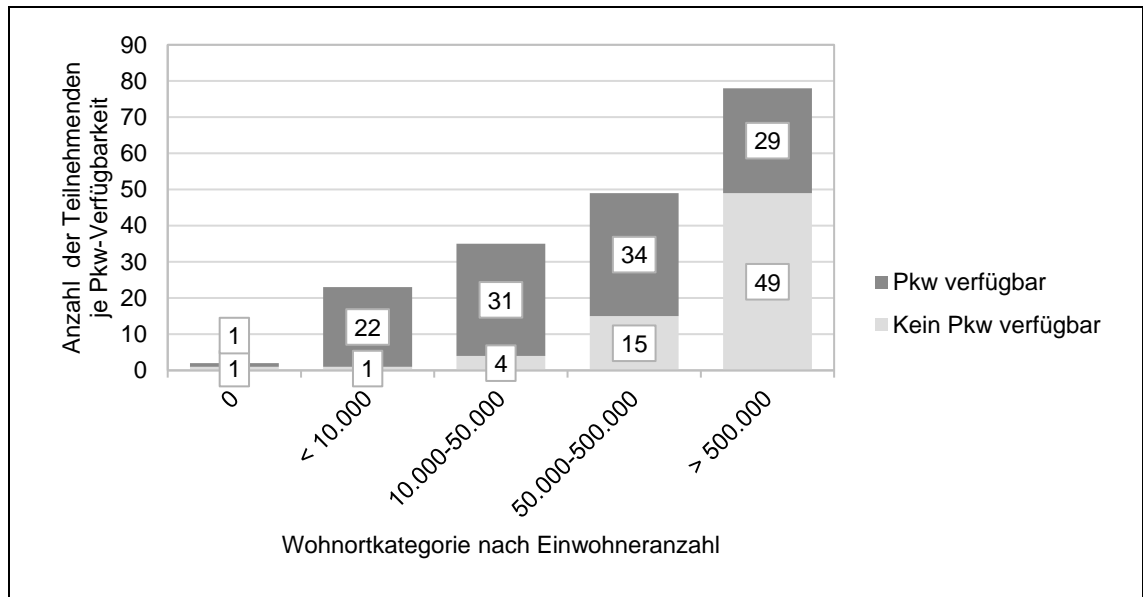


Abbildung 35: Stichprobenverteilung nach Pkw-Verfügbarkeit und Einwohneranzahl des Wohnorts (Kategorie 0 entspricht keiner Angabe). n = 187.

Obwohl 63 Prozent der Befragten ein Pkw zur Verfügung steht, spiegelt sich dies nicht in der Auswahl der Referenzwege wieder (vgl. Abbildung 36). Lediglich 26 Prozent der gewählten Referenzwege werden mit dem privaten Pkw zurückgelegt. Besonders auffällig ist der mit 36 Prozent sehr hohe Anteil der mit dem Fahrrad zurückgelegten Referenzwege. Ähnlich viele Referenzwege (38 Prozent) werden dem ÖV zugeordnet. Bezüglich des Wegezwecks werden die meisten Referenzwege dem Wegezweck Arbeit (58 Prozent), dann Sport/Freizeit (17 Prozent), Schule/Uni/Ausbildungsstätte (14 Prozent), Einkaufen (8 Prozent) und Sonstigem (3 Prozent) zugeordnet.

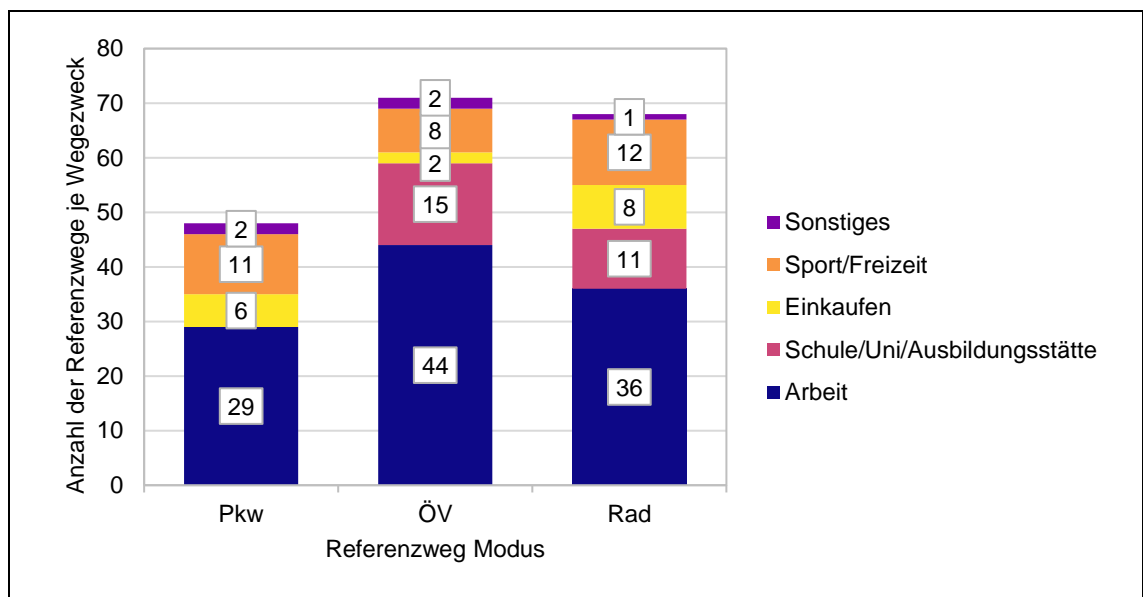


Abbildung 36: Anzahl Referenzwege nach Modus und Wegezweck. n = 187.

5.2.3 Modellschätzung und Analyse der Ergebnisse

Die erhobenen Daten werden in tabellarischer Form aufgearbeitet und dienen als Grundlage zur Moduswahlmodellschätzung. Da je Person zehn Entscheidungssituationen bearbeitet wurden, liegen insgesamt 1.870 Wahlentscheidungen vor anhand derer die Nutzenfunktionen geschätzt werden können.

Mittels Maximum Likelihood Schätzung werden Parameterwerte für Nutzenfunktionen verschiedener Multinomialer Logit Modelle (MNL) geschätzt. Das MNL wird als Modellform gewählt, da es eine einfache Modellstruktur aufweist (vgl. Kapitel 2.1.1 und Formel (2), S. 26) und bereits im VRS-Modell verwendet wird. Mittels Likelihood Ratio Tests werden die so erstellten Modelle mit unterschiedlichen Kombinationen aus generischen und alternativenspezifischen Parametern miteinander verglichen. Formel (18) zeigt die auf dieser Grundlage gewählte Form der Nutzenfunktionen. Die Parameter der Attribute Fahrtzeit und Wartezeit sind alternativenspezifisch angelegt, während die von Zu- und Abgangszeit sowie Kosten generisch ausgeprägt sind. Eine Änderung der generischen Parameter in alternativenspezifische hätte entsprechend dem Likelihood Ratio Test keine signifikante Verbesserung der Modellgüte zur Folge.

$$v_i = \beta_{0i} + \beta_{TT,i} \cdot x_{TT,i} + \beta_{AE} \cdot x_{AE,i} + \beta_{WT,i} \cdot x_{WT,i} + \beta_{NT} \cdot x_{NT,i} + \beta_C \cdot x_{C,i} + \beta_{VAV} \cdot x_{VAV,i} \quad (18)$$

mit

v_i	Nutzen der Moduswahlalternative $i \in I$
I	Menge I der Moduswahlalternativen i mit $I = [Fu\beta, Rad, \ddot{O}V, RS, Pkw]$
β_{0i}	alternativenspezifische Konstante β_0 des Nutzens der Alternative i
β_{ki}	alternativenspezifischer Parameter zur Gewichtung des Nutzens des Attributwerts x_{ki}
β_k	generischer, alternativenübergreifender Parameter zur Gewichtung des Nutzens des Attributwerts x_{ki}
x_{ki}	Wert x des Attributs $k \in K$ der Alternative i
K	Menge der betrachteten Attribute k mit $K = [TT, AE, WT, NT, C, VAV]$, wobei Fahrtzeit TT , Zu- und Abgangszeit AE , Wartezeit WT , Umsteigehäufigkeit NT , Kosten C , Fahrzeugautomatisierung VAV

Die Ergebnisse der Parameterschätzung sind in Tabelle 10 dargestellt. Der Modus Rad wird als Referenzmodus gewählt, da er in allen Fragensets enthalten ist. Entsprechend ist dessen alternativenspezifische Konstante per Definition Null. Zudem ist in Tabelle 10 die Standardabweichung jedes Parameters sowie dessen t-Wert zur Hypothese, dass der Parameter in Wahrheit Null ist, angegeben. Um nach t-Test mit 95-prozentiger Sicherheit (Konfidenzniveau 0,95) sagen zu können, dass ein Parameter nicht in Wahrheit

Null ist, muss der Betrag des berechneten t-Werts größergleich 1,96 sein. Dies ist für alle entsprechend Formel (18) verwendeten Parameter bis auf zwei der Fall. Zum einen ist die alternativenspezifische Konstante des Modus Fuß nicht zu 95-prozentiger Sicherheit verschieden von Null. Das bedeutet, dass der mittlere Einfluss nicht erfasster Faktoren auf den Nutzen des Modus Fuß nicht signifikant verschieden zum Einfluss nicht erfasster Faktoren auf den Modus Rad ist. Der zweite nicht signifikant von Null abweichende Parameter beschreibt den Einfluss der Automatisierung eines Ridesharingfahrzeugs auf das Wahlverhalten der Umfrageteilnehmenden. Demnach hatte es in dieser Befragung für die Teilnehmenden keinen Einfluss, ob die Ridesharingfahrzeuge von einer Person gesteuert werden oder aber vollautomatisiert fahren.

Parameter	Schätzwert	Standardabweichung	t-Wert zur Nullhypothese
beta_0_Pkw	-2,58349	0,40852	-6,3241
beta_0_ÖV	-1,17417	0,42763	-2,7457
beta_0_RS	-1,84887	0,40419	-4,5743
beta_0_Rad	0	NA	NA
beta_0_Fuß	0,70900	0,50369	1,4076
beta_TT_Pkw	-0,10273	0,01271	-8,0844
beta_TT_ÖV	-0,10216	0,01188	-8,5999
beta_TT_RS	-0,10980	0,00971	-11,3040
beta_TT_Rad	-0,19389	0,01059	-18,3008
beta_TT_Fuß	-0,21299	0,01531	-13,9104
beta_AE	-0,12086	0,01267	-9,5408
beta_WT_ÖV	-0,16781	0,03028	-5,5410
beta_WT_RS	-0,08389	0,01742	-4,8151
beta_NT	-0,50220	0,07575	-6,6293
beta_C	-0,48413	0,04966	-9,7495
beta_VAV	0,01847	0,14696	0,1257

(Hinweis: grau entspricht nicht signifikant von Null verschiedenen Parameterwerten
Abkürzungen: Fahrtzeit TT, Zu- und Abgangszeit AE, Wartezeit WT, Umsteighäufigkeit NT, Kosten C, Fahrzeugautomatisierung VAV)

Tabelle 10: Ergebnisse der Parameterschätzung zur Moduswahl für ein Multinomiales Logit Modell mit Nutzenfunktionen entsprechend Formel (18).

Als Grundlage zur Interpretation der Parameterwerte eignen sich Zeitwertsätze. Als Quotient aus Gewichtungparameter für Kosten und Gewichtungparameter für beispielsweise Fahrtzeit geben diese Werte an, wie viel eine Zeitersparnis monetär wert ist. Tabelle 11 gibt die Zeitwertsätze der in Tabelle 10 dargestellten Parameterwerte wieder. In Bezug auf die Fahrtzeitbewertung der Modi lässt sich erkennen, dass die Fahrtzeit mit Fahrrad und zu Fuß deutlich negativer bewertet wird als bei Pkw, ÖV und Ridesharing. Das entspricht den Erwartungen. Die Zahlungsbereitschaft der Teilnehmenden für eine

Stunde Zeitersparnis reicht von 13 Euro bei Fahrtzeit im Pkw und ÖV bis 26 Euro für eine Stunde Gehzeit. Diese Werte liegen in einem ähnlichen Bereich wie die im VRS-Modell verwendeten Zeitwertsätze. Die Fahrtzeit in Ridesharingfahrzeugen wird etwas negativer bewertet, das heißt die Zeitersparnis ist monetär mehr wert, als die Fahrtzeit in Pkw und ÖV. Das stimmt mit Ergebnissen von KOLAROVA (2021) überein, jedoch sind die dort ermittelten Zeitwertsätze insgesamt deutlich niedriger. Der Zeitwert von Zu- und Abgangszeit liegt mit 15 Euro je Stunde etwas über dem Zeitwert für Fahrtzeit im Ridesharingfahrzeug.

	Modus	€/min	€/h
Fahrtzeit TT	Pkw	0,21	13
	ÖV	0,21	13
	Ridesharing	0,23	14
	Rad	0,40	24
	Fuß	0,44	26
Zu- und Abgangszeit AE	(generisch)	0,25	15
Wartezeit WT	ÖV	0,35	21
	Ridesharing	0,17	10

Tabelle 11: Zeitwertsätze entsprechend Parameterschätzung in Tabelle 10.

Auffällig an den ermittelten Zeitwertsätzen und nicht den Erwartungen entsprechend ist die Diskrepanz zwischen dem Zeitwert für Wartezeit auf ein Ridesharingfahrzeug (10 Euro je Stunde) und auf ein Fahrzeug des ÖV (21 Euro je Stunde). Entsprechend den geschätzten Parameterwerten warten die Personen also sehr viel lieber auf ein Ridesharingfahrzeug als auf ein Fahrzeug des ÖV. Eine mögliche Erklärung für dieses Ergebnis liegt darin, dass sich die Umfrageteilnehmenden die Wartesituationen unterschiedlich vorgestellt haben. Womöglich wird die Wartezeit für Ridesharing als Wartezeit zuhause anstatt an einer Haltestelle oder auch die Wartezeit für den ÖV als Verspätung interpretiert.

Neben den monetären Zeitwertsätzen lässt sich für den ÖV zudem berechnen, wieviel Fahrzeiterparnis einen Umstieg wert ist. Für die Umfrageergebnisse liegt dieser Wert bei 4,9 Minuten je Umstieg und damit zwischen den im VRS-Modell verwendeten Werten, die von 1,8 bis 8,8 Minuten je Umstieg reichen.

Neben den Zeitwertsätzen bieten die alternativenspezifischen Konstanten, die die unbeobachteten Faktoren der Moduswahl abbilden, Informationen zum Wahlverhalten der Umfrageteilnehmenden. Diese Parameter werden auch Modusgunstparameter genannt, da sie auch nicht-quantitativ beschreibbare Einstellungen der Personen zu einzelnen Modi enthalten. Tabelle 10 zeigt, dass Fahrradfahren in Bezug auf die unbeobachteten Faktoren ungewöhnlich beliebt ist. Die Umfrageteilnehmenden sind insgesamt sehr fahradaffin, was sich auch im hohen Anteil der mit dem Fahrrad zurückgelegten Referenzwege abzeichnet. Insbesondere der Nutzen des Pkw im Vergleich zum Fahrrad wird von unbeobachteten Faktoren stark negativ beeinflusst, gefolgt von Ridesharing und ÖV. Zu

Fuß gehen wird ähnlich zu Radfahren wahrgenommen. Eine mögliche Erklärung könnte ein ausgeprägtes Umweltbewusstsein der Umfrageteilnehmenden sein. Zudem wurde das Wetter als ohne Niederschlag bei mittlerer Temperatur festgelegt, was die Modi Fahrrad und zu Fuß gehen attraktiver macht.

Um den Einfluss der nicht beobachteten Faktoren besser einschätzen zu können, werden die alternativenspezifischen Konstanten der in Formel (18), S. 108 dargestellten Nutzenfunktionen mittels Dummy Coding (siehe dazu HENSHER ET AL. (2005)) erweitert, um den Einfluss soziodemografischer und fragensetspezifischer Merkmale abzubilden. Die Parameterwerte des so neu geschätzten Modells sind in Anhang 3 dargestellt.

Es wurden die folgenden Eigenschaften untersucht:

- Personenbezogen: Pkw-Verfügbarkeit, Geschlecht, Tätigkeit
- Referenzwegbezogen: Modus, Wegezweck
- Umfragedesignbezogen: Bearbeitetes Fragenset (Entscheidungssituationen)

Die Eigenschaften Pkw-Verfügbarkeit, Geschlecht und das bearbeitete Fragenset haben jeweils nach t-Test keinen 95 prozentig sicher von Null abweichenden Einfluss auf die Moduswahl. Für die Eigenschaften Referenzwegmodus, -wegezweck und Personentätigkeit sind die Ergebnisse in Tabelle 12 qualitativ aufgearbeitet (Ergebnisse der Tabelle 12 zugrundeliegenden Parameterschätzung siehe Anhang 3). Als Referenz ist jeweils der Modus Rad gewählt. Es lässt sich beispielsweise aus der ersten Zeile ablesen, dass Teilnehmende, die auf ihrem Referenzweg bislang den Pkw nutzen, jeweils etwas lieber Pkw, ÖV oder zu Fuß gehen wählen anstatt Fahrrad zu fahren oder Ridesharing zu nutzen. Betrachtet man die Spalten der Tabelle 12, zeichnet sich, feiner aufgeschlüsselt, ein ähnliches Bild zu den in Tabelle 10, S. 109 gegebenen Schätzwerten des ursprünglichen MNL-Modells. In Bezug auf Ridesharing lässt sich erkennen, dass unter den gegebenen Rahmenbedingungen vor allem Wege, die jetzt mit Pkw oder ÖV zurückgelegt werden, durch Ridesharing ersetzt werden können. Unter den Wegezwecken hat Einkaufen die größte Affinität zum Ridesharing gefolgt von Bildung (Schule, Uni oder Ausbildungsstätte). Gleichzeitig bilden jedoch Studierende, die mit 22 der 26 zugrundeliegenden Wege einen besonders hohen Anteil in der Gruppe mit Wegezweck Bildung haben, die Tätigkeitsgruppe mit der geringsten Affinität gegenüber Ridesharing. Die endgültige alternativenspezifische Konstante ergibt sich stets als Kombination der Einflussfaktoren aller Gruppen. Die jeweilige Anzahl der in der Umfrage vertretenen Kombinationen der in Tabelle 12 dargestellten Merkmale sind in Anhang 4 abgebildet.

	n	Rad	Pkw	ÖV	RS	Fuß	
Referenzweg: Modus							
Pkw	48	o	+	+	o	+	
ÖV	71	o	-	+	+	++	
Rad	68	o	---	--	--	o	
Referenzweg: Wegezweck							
Arbeit	109	o	---	--	--	o	
Schule/Uni/Ausbildungsstätte	26	o	-	-	-	+	
Einkaufen	16	o	-	o	o	+	
Sport/Freizeit	31	o	---	--	--	- / o	
Sonstiges	5	o	o	-- / -	-- / -	+	
Umfrageteilnehmende: Tätigkeit							
Erwerbstätigkeit Vollzeit	113	o	---	--	--	o	
Erwerbstätigkeit Teilzeit	18	o	---	--	--	o	
Studium	40	o	---	---	---	-- / -	
Rente	12	o	---	--	--- / ---	- / o	
Ohne Erwerbstätigkeit, Schule, Ausbildung, ohne Angabe	4	o	-	o	-	- / o	
Zeichenerläuterung:							
--- / - - / - Bei dieser Gruppe lässt β_{0i} auf sehr stark/stark/leicht negativere Einstellung zu Modus i im Vergleich zu Rad schließen							
o Ähnlich attraktiv wie Rad (neutral)							
+ + / + Bei dieser Gruppe lässt β_{0i} auf stark/leicht positivere Einstellung zu Modus i im Vergleich zu Rad schließen							
grau Unter Einbeziehen von nach t-Test nicht sicher von Null abweichender Parameter abweichendes qualitatives Ergebnis							
Intervallgrenzen je Zeichen:							
Zeichen:	---	--	-	o	+	++	+++
β_{0i} :	$]-\infty; -3,5[$	$[-3,5; -2,0[$	$[-2,0; -0,5[$	$[-0,5; 0,5[$	$[0,5; 2,0[$	$[2,0; 3,5[$	$[3,5; \infty[$

Tabelle 12: Gruppenspezifische unbeobachtete Einflussfaktoren (qualitativ nach Anhang 3) entsprechend alternativenspezifischer Konstante β_{0i} . Rad wird jeweils als Referenz auf null gesetzt.

5.2.4 Zusammenfassung und Bewertung

Insgesamt zeichnet sich bei Auswertung der Modellschätzung das Bild, dass Fahrradfahren unter den Umfrageteilnehmenden sehr beliebt ist. Insbesondere der private Pkw wird als alternativer Modus eher abgelehnt. Ridesharing als neue Moduswahlalternative ist besonders für Referenzwege attraktiv, die bisher mit dem privaten Pkw oder mit dem ÖV zurückgelegt werden. Ein Grund dafür kann in der Gruppe von Teilnehmenden gefunden werden, die sehr fahrradaffin sind, was sich auch in der Wahl ihrer Referenzwege widerspiegelt. Ein weiterer Grund ist, dass mit dem vorgegebenen trockenen und mittel temperierten Wetter ein für Fahrradfahren attraktives Wetter gegeben ist. Bei abweichenden Witterungsbedingungen oder auch größerer Unsicherheit bezüglich des Wetters könnten die Wahlentscheidungen der Teilnehmenden deutlich abweichen. Einige

der Teilnehmenden nutzten auch den Kommentarbereich der Umfrage, um auf diesen Umstand hinzuweisen.

Die Automatisierung der Ridesharingfahrzeuge hat keinen Einfluss auf das Wahlverhalten der Umfrageteilnehmenden, die Fahrtzeit im Ridesharingfahrzeug wird ähnlich, aber etwas negativer bewertet als in Pkw und ÖV. Die Wartezeit auf ein Ridesharingfahrzeug wird sehr viel angenehmer empfunden als die gleiche Wartezeit auf ein ÖV-Fahrzeug. Dies ist vermutlich auf ein abweichendes Verständnis bezüglich der Wartesituation zurückzuführen.

Auf Grund der geringen und nicht repräsentativen Stichprobe ist es nicht zielführend, das anhand der Erhebung geschätzte Moduswahlmodell in das makroskopische Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart (VRS-Modell) zu implementieren. Dennoch ist die Erhebung samt Modellschätzung in zweierlei Hinsicht hilfreich. Zum einen geben die geschätzten Moduswahlparameter Aufschluss darüber, wie Ridesharing im Vergleich zu anderen Modi wahrgenommen wird, welche Eigenschaften für das Wahlverhalten der Teilnehmenden relevant sind und in welchen Situationen Ridesharing besonders attraktiv ist. Zum anderen eignet sich die im kleinen Rahmen durchgeführte Erhebung als Pretest bzw. Prototyp für eine mögliche zukünftige Umfrage, die, größer angelegt, als Grundlage für das Schätzen eines Moduswahlmodells für das VRS-Modell oder auch andere, ähnlich aufgebaute Modelle dienen kann. Ansatzpunkte zur Anpassung der Erhebung, die unter Abwägung von Nutzen- und Informationsgewinn gegenüber zusätzlichem Aufwand für den Modell-/Umfrageerstellenden und die Befragten bei erneuter Durchführung berücksichtigt werden sollten, sind im Folgenden zusammengetragen. Ein Großteil deckt sich mit im Kommentarfeld der Umfrage hinterlassenen Anmerkungen der Teilnehmenden.

- **Zusätzliche Attribute:** Als weitere, nicht enthaltene Attribute, die einen Einfluss auf die Moduswahl haben, wurde allgemein das Wetter und dessen Prognoseunsicherheit genannt. Pkw-spezifisch wurde auf fehlende Angaben zur Parkplatzsituation hingewiesen. In Bezug auf den ÖV (und Ridesharing) wurde auf Zeitkartenbesitz, Zuverlässigkeit, Fahrplankontakt und zeitliche Verfügbarkeit über den Tag hingewiesen.
- **Realistischere Attributwerte:** Sowohl in Bezug auf die Kosten als auch die Zeiten wurde teilweise angemerkt, dass diese unrealistisch seien oder vor allem gebietspezifisch entsprechend einer Großstadt geprägt sind. Bei einem Anpassen der Attributwerte sollte mitbeachtet werden, dass dadurch die Effizienz der Entscheidungssituationen hinsichtlich der Parameterschätzung gemindert werden kann. Um für Einwohner aller von ländlich bis städtisch geprägten Gebietstypen realitätsnähere Fahrtzeitkombinationen vorhalten zu können, müsste eine weitere Differenzierung der Fragensets erfolgen. In Bezug auf die Fahrtkosten ist es insbesondere schwierig, geeignete Kostensätze für den privaten Pkw zu wählen. Es stellt sich die Frage, ob lediglich direkte Kosten der Fahrt oder auch langfristige Kosten integriert werden sollen. Zeitkarten im ÖV werfen eine ähnliche Fragestellung auf.

- Feinere Unterscheidung der Verkehrsmittel des ÖV: Eine Fahrt im Bus wird anders wahrgenommen als in der Bahn.
- Genauere Definition der Wartezeit in Ridesharing und ÖV, um nicht einschätzbare Vorstellungen der Umfrageteilnehmenden und deren Einfluss auf die Moduswahl zu minimieren. Die H KRipoo (FGSV (2021)) bieten eine Erläuterung zu Wartezeiten im ÖV und Ridesharing aus Sicht der Verkehrsplanung.
- Angaben bzw. Annahmen zum Rückweg: Verkehrsteilnehmende treffen ihre Moduswahl auch in Abhängigkeit nachfolgend geplanter Wege.

5.3 Zwischenfazit

Soll Ridesharing oder Carsharing in Konkurrenz zum ÖV angeboten werden und daher als neue Moduswahlalternative in das Modell integriert werden, ergeben sich Fragestellungen in Bezug auf den Umgang mit Modelleigenschaften des weit verbreiteten Multinomialen Logit Modells (IIA-Eigenschaft und Annahme voneinander unabhängiger, gleichverteilter stochastischer Nutzenanteile) sowie in Bezug auf die spezifischen Parameterwerte der Nutzenfunktionen. Beide Aspekte können kaum anders als mittels aufwändiger Erhebungen und Modellschätzungen oder aber tiefgreifender Annahmen behandelt werden. Die präsentierte Erhebung zeigt einen Weg auf. Wird das Sharingangebot als Teil des ÖV integriert, reduziert sich die Problemstellung in Bezug auf die Moduswahl auf den Teilbereich der Parameterschätzung der Nutzenfunktionen. Auch hier müssen jedoch Annahmen getroffen werden, die möglichst durch geeignete Erhebungen gestützt werden sollten, da sie zentrale Stellschrauben der Verkehrsnachfrageberechnung darstellen.

6 Erweiterung der Verkehrsmittel- und Verbindungswahl im öffentlichen Verkehr

Um Sharingangebote als Teil des ÖV-Angebots zu integrieren, müssen die Verkehrsmittelwahl und Verbindungswahl erweitert werden. Im Folgenden werden am Beispiel Ridesharing die Anforderungen an die Modellierungsmethode (Kapitel 6.1) sowie ein Ansatz zur Modellierung (Kapitel 6.2) vorgestellt. Die Modellierungsmethode für Ridesharing kann grundsätzlich ebenso für Carsharing verwendet werden, indem der Bündelungsschritt ausgelassen wird. In Kapitel 6.3 werden die praktische Umsetzung der vorgestellten Modellierungsmethode und die Auswirkungen der Erweiterung des ÖV um Ridesharing auf die Angebotsqualität erläutert.

6.1 Anforderungen an die Modellierungsmethode

Die Integration von Ridesharing in den ÖV bedeutet, dass zwei in der Modellierung unterschiedlich umgesetzte Systeme kombiniert werden. Ridesharingfahrzeuge nutzen das Verkehrssystem Pkw. Zusätzlich dazu muss in dem Fall, dass Ridesharing als Zubringer dient, eine Koordination mit fahrplangebundenen öffentlichen Verkehrsmitteln stattfinden. Durch den Betreiber werden weitere Rahmenbedingungen wie die zeitliche und räumliche Verfügbarkeit des Ridesharingangebots und dessen Preisgestaltung festgelegt, die in der Modellierungsmethode umgesetzt werden müssen.

In fahrplanbasierten Umlegungsmodellen werden neben den räumlichen Restriktionen des fahrplangebundenen ÖV-Angebots auch die zeitlichen Restriktionen in Form von Fahrplänen berücksichtigt. Je Quelle-Ziel-Relation wird im Umlegungsmodell eine Menge zeitlich festgelegter Verbindungen als Wahlmöglichkeiten erstellt. Wird Ridesharing als Zubringer zu fahrplangebundenen öffentlichen Verkehrsmitteln integriert, wird diese Menge an Wahlmöglichkeiten erweitert. Dabei dient der Abfahrts- oder Ankunftszeitpunkt des fahrplangebundenen Verkehrsmittels als Ankerpunkt, der die Ridesharing-Zubringer-Fahrt zeitlich definiert (vgl. Abbildung 37 oben-links und oben-rechts). Direktes Ridesharing ist nicht an einen Fahrplan gebunden und kann jederzeit abfahren. Dadurch bestehen keine Ankerpunkte oder festgelegte Bedienungshäufigkeiten. Die Vorgabe einer maximalen Wartezeit für Fahrgäste ersetzt die Bedienungshäufigkeit. Zur Nutzenberechnung dient für direktes Ridesharing statt einer festen Wartezeit wie bei fahrplangebundenen Verkehrsmitteln die mittlere zu erwartende Wartezeit. Abbildung 37 zeigt zum einen die Ergänzung des ÖV-Angebots um ganztägiges (unten-links) sowie zum anderen um ein zeitlich auf die Zeit vor Betriebsbeginn der S-Bahn begrenztes direktes Ridesharingangebot (unten-rechts).

Mit einem entsprechend Abbildung 37 (unten-links) erweiterten ÖV-Angebot besteht beispielsweise für eine Person, die zwischen 04:30 Uhr und 04:45 Uhr abfahren will, die Menge an Wahlmöglichkeiten aus genau einer Alternative, direktes Ridesharing. Für eine Person, die zwischen 05:30 Uhr und 05:45 Uhr abfahren will, ergibt sich die Menge

der Wahlmöglichkeiten aus den drei Alternativen Bus und S-Bahn, Ridesharing und S-Bahn oder direktem Ridesharing. In diesem Fall spielt auch die Preisgebung eine Rolle, da dadurch beispielsweise die andernfalls unattraktive Busverbindung in der Menge der Wahlmöglichkeiten gehalten werden kann.

Erweiterungen, die die räumliche und zeitliche Flexibilität von Ridesharingangeboten in Gänze in fahrplanbasierte Verfahren integrieren können, sind derzeit nicht Stand der Technik. Darüber hinaus ist aus planerischer Sicht zu bedenken, dass es unter Umständen auch nicht zielführend ist, in den ÖV integrierte Ridesharingverbindungen parallel und damit in direkter Konkurrenz zu fahrplangebundenen Verkehrsmitteln anzubieten. Eine räumliche und/oder zeitliche Trennung dient dem Ziel, eine möglichst hohe Auslastung fahrplangebundener Verkehrsmittel beizubehalten. Im Folgenden wird eine Modellierungsmethode vorgestellt, die auf der räumlichen Trennung von Ridesharing und fahrplangebundenen Angeboten beruht.

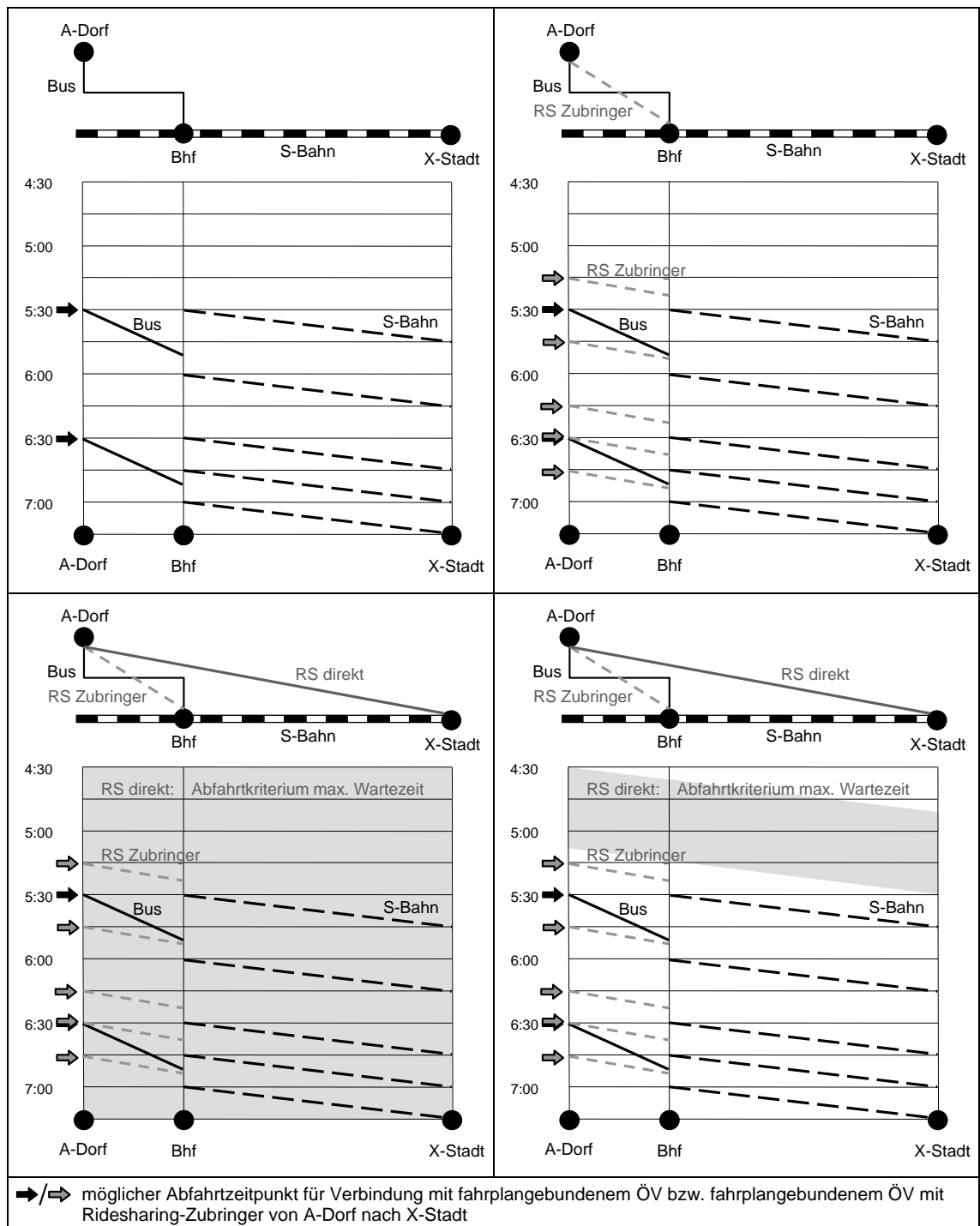


Abbildung 37: Beispielhafte Darstellung zeitlicher Integration von Ridesharing in den ÖV (Zeitraum 04:30 Uhr bis 07:15 Uhr). Oben-links: fahrplangebundener ÖV, oben-rechts: fahrplangebundener ÖV ergänzt um Ridesharing-Zubringer, unten-links: fahrplangebundener ÖV ergänzt um Ridesharing-Zubringer und direktes Ridesharing (ganztäglich), unten-rechts: fahrplangebundener ÖV ergänzt um Ridesharing-Zubringer und direktes Ridesharing (04:30 Uhr bis Betriebsbeginn S-Bahn).

6.2 Modellierungsmethode

Die vorgestellte Modellierungsmethode ist in Abbildung 38 schematisch dargestellt. Grundlage der Methode ist die Unterteilung aller Quelle-Ziel-Relationen des Verkehrsnachfragemodells in drei ÖV-Angebotstypen:

1. Fahrplangebundener ÖV
2. Direktes Ridesharing
3. Fahrplangebundener ÖV mit Ridesharing als Zubringer

Die Wahl der ÖV-Angebotstypen je Relation kann in Abhängigkeit der relationsspezifischen Kenngrößen der einzelnen Angebotstypen erfolgen, sodass beispielsweise zielgerichtet Umstiege vermieden werden, eine minimale Bedienungshäufigkeit vorgehalten wird, oder ein festzulegendes Reisezeitverhältnis von Pkw zu ÖV eingehalten wird. Darüber hinaus sind planerische Festlegungen wie beispielsweise das Vorhalten von Ridesharingangeboten nur in bestimmten Gebieten möglich.

Gemäß den relationsspezifischen ÖV-Angebotstypen werden ÖV-Kenngrößenmatrizen zusammengestellt, die die jeweils dem Angebotstyp entsprechenden Kenngrößen enthalten. Die so erstellten ÖV-Kenngrößenmatrizen werden in der Ziel- und Moduswahl verwendet, um die relations- und 15-Minuten-Zeitintervall-feine ÖV-Nachfrage zu berechnen. Die Zeitintervalllänge von 15 Minuten ermöglicht die Integration eines direkten Ridesharingangebots, das eine maximale Wartezeit von 15 Minuten oder einem Vielfachen davon aufweist. Die Zeitintervalllänge kann nach Bedarf der Modellerstellenden und Vermögen der Datengrundlage des Modells angepasst werden.

Die Personennachfrage nach direktem Ridesharing (ÖV-Angebotstyp 2) kann der Ziel- und Moduswahl unmittelbar entnommen werden. Personennachfrage der ÖV-Angebotstypen 1 und 3 wird mittels einer fahrplanbasierten ÖV-Umlegung auf das Angebotsnetz umgelegt. Aus den Ergebnissen der Verbindungswahl wird die Personennachfrage nach Ridesharing-Zubringerfahrten ausgelesen und in einer Nachfragematrix gespeichert. Die Quelle-Ziel-Relation ergibt sich dabei aus Quell- bzw. Zielverkehrszelle des zurückgelegten Wegs und der Verkehrszelle, in der der Umstieg in ein bzw. aus einem fahrplangebundenen Verkehrsmittel stattfindet. Die zeitliche Einordnung wird anhand der zeitlichen Restriktion des auf dieser Verbindung genutzten fahrplangebundenen Verkehrsmittels getroffen.

Für die relations- und zeitintervallfein vorliegende Personennachfrage nach direktem Ridesharing und Ridesharing als Zubringer können anschließend in Bündelungs- und Umlaufbildungsschritt benötigte Ridesharing-Last- und -Leerfahrten sowie die benötigte Flottengröße berechnet werden.

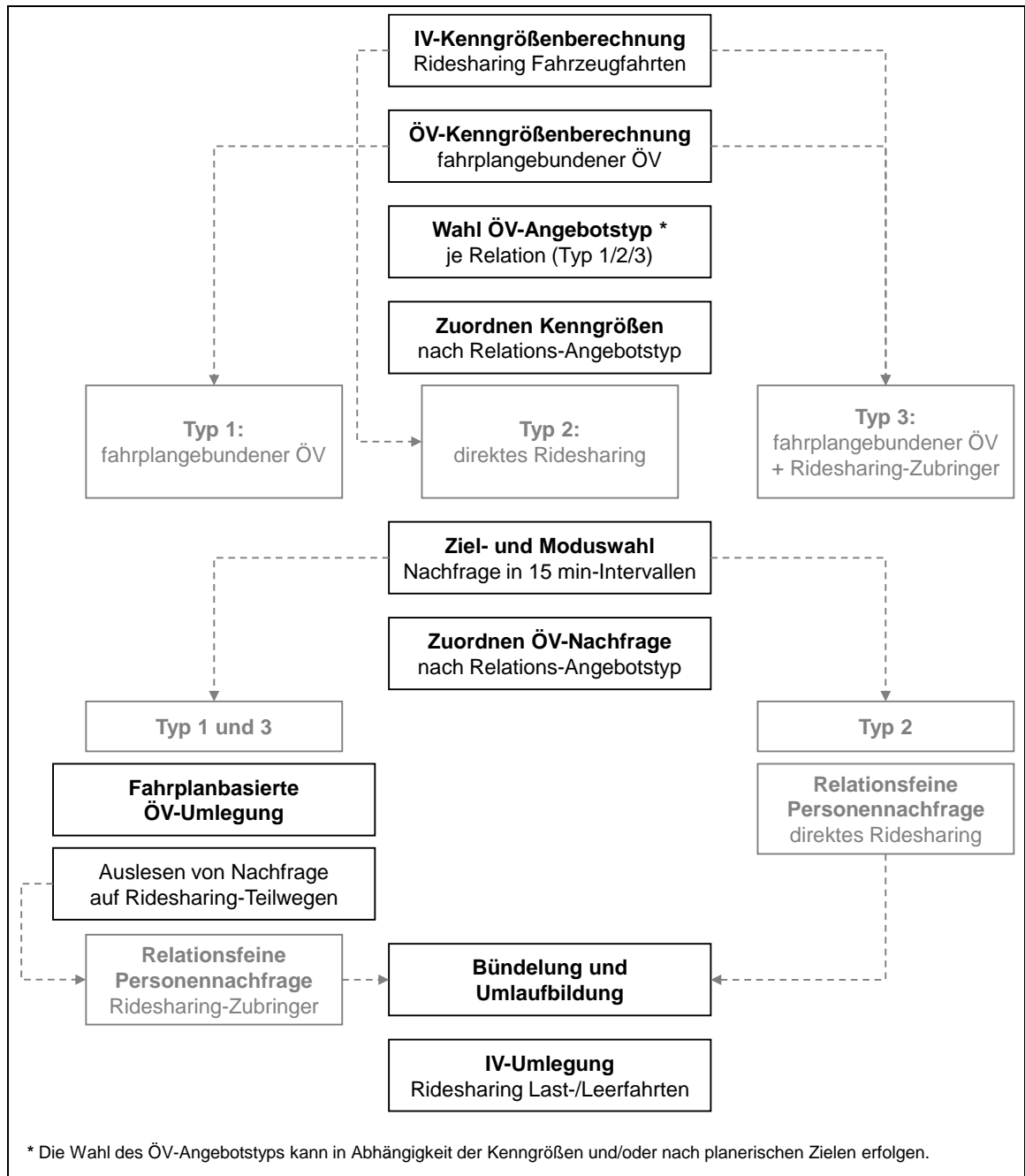


Abbildung 38: Ausschnitt Berechnungsablauf für in den ÖV integriertes Ridesharing.

6.3 Beispielanwendung

Das folgende Anwendungsbeispiel, in dem die in Kapitel 6.2 vorgestellte Methode im makroskopischen Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart umgesetzt ist, entstammt den Berechnungen von RICHTER ET AL. (2021) für den Planungsraum Schurwald (vgl. Kapitel 3.3). Direktes Ridesharing wird mit einer maximalen Wartezeit von 15 Minuten angeboten. Sowohl direktes Ridesharing als auch Ridesharing als Zubringer werden zum gleichen ÖV-Tarif angeboten wie Bus- und Bahnfahrten. In den betrachteten

Szenarien ersetzt Ridesharing im Planungsraum den Busverkehr. Dadurch ergeben sich die in Tabelle 13 zusammengefassten Kriterien zur Zuordnung der ÖV-Angebotstypen je Quelle-Ziel-Relation.

Typ-Nr.	ÖV-Angebotstyp	Zeitliche Restriktion	Räumliche Restriktion
1	Fahrplangebundener ÖV	keine (Festlegung gilt gantztägig)	Quell- und Zielverkehrszelle werden weiterhin vom fahrplangebundenen ÖV bedient.
2	Direktes Ridesharing	keine (Festlegung gilt gantztägig)	Binnenverkehr des Planungsraums und <ul style="list-style-type: none"> • mindestens eine der Verkehrszellen wird nicht länger vom fahrplangebundenen ÖV bedient oder <ul style="list-style-type: none"> • ein Umstieg ist erforderlich.
3	Fahrplangebundener ÖV mit Ridesharing als Zubringer	keine (Festlegung gilt gantztägig)	Quell- oder Zielverkehr des Planungsraums und die Verkehrszelle im Planungsraum wird nicht länger vom fahrplangebundenen ÖV bedient. *

* Ausnahme zu Typ 3 für Fahrten vom Planungsraum zu/von an den Planungsraum angrenzende Verkehrszellen: Bei Luftlinienweite bis 15 km werden Relationen Typ 2 zugeordnet, ansonsten Typ 3.

Tabelle 13: Quelle-Ziel-Relationsfeine Typisierung des ÖV-Angebots im Anwendungsfall Schurwald entsprechend RICHTER ET AL. (2021).

Um Ridesharing abbilden zu können, muss neben den Berechnungsschritten auch das Angebotsmodell angepasst werden. Dies betrifft insbesondere zwei Bereiche. Der erste Bereich ist Teil der IV-Seite des Ridesharing. Es müssen Verbindungen für Zu- und Abgangswege zu und von Ridesharingfahrzeugen erstellt werden, die Verkehrszellenschwerpunkte mit Ridesharing-Haltepunkten im Straßennetz verbinden (Anbindungen). Durch Festlegen einer maximalen Zu-/Abgangsweite zu Ridesharing-Haltepunkten von szenariospezifisch 500 Meter bzw. 150 Meter Luftlinie, wird die durchschnittliche Zu-/Abgangszeit im ÖV je Verkehrszelle im Planungsraum von 8,0 Minuten im Bezugsfall auf 5,7 Minuten bzw. 2,8 Minuten reduziert (RICHTER ET AL. (2021)).

Der zweite Bereich betrifft die Einbindung von Ridesharing-Zubringer-Fahrten in den fahrplangebundenen ÖV. Um die Zubringerfahrten in die fahrplanbasierte Umlegung zu integrieren, werden sie als Anbindungen von der Start-/Zielverkehrszelle zur Umstiegshaltestelle zu einem fahrplangebundenen Verkehrsmittel modelliert. Diese Luftlinienverbindungen enthalten alle für diesen Fahrtabschnitt relevanten Attribute. Es werden die Zu-/Abgangszeit zu/vom Ridesharingfahrzeug in der Verkehrszelle, Fahrtzeit im Ridesharingfahrzeug im Straßennetz, die Erhöhung der Anzahl der Umstiege um eins sowie Umsteigegeh- und -wartezeit zum fahrplangebundenen Verkehrsmittel hinterlegt. Zu- und Abgangszeiten sowie die Fahrtzeiten werden mittels einer IV-Kenngrößenberechnung relationsfein berechnet. Die Umsteigegeh- und -wartezeiten bei Umstieg in ein fahrplangebundenes Verkehrsmittel werden einheitlich auf 3 Minuten und 5 Minuten festgelegt. Die Umsteigewartezeit dient gleichzeitig als Puffer, um mögliche Fahrtzeitschwankungen im Ridesharing abzufedern, und sollte daher nicht gleich null gesetzt werden.

Theoretisch könnte jede Haltestelle eines fahrplangebundenen Verkehrsmittels als Umstiegspunkt von/zu Ridesharing als Zubringer dienen. Das ist aber weder in Bezug auf die benötigte Rechenkapazität noch in Hinblick auf planerische Zielvorstellungen Erfolg versprechend. Um einen möglichst hohen Besetzungsgrad bei Ridesharingfahrten zu erreichen, begrenzen RICHTER ET AL. (2021) die bedienten Ridesharing-Umstiegshaltestellen je Verkehrszelle auf eine nördlich und eine südlich des Planungsraums gelegene Haltestelle des schienengebundenen Verkehrs. Da Verbindungen in Richtung Stuttgart im Bezugsfall die am stärksten nachgefragte Verbindungsmenge bilden, werden Haltestellen, die eine gute Anbindung in diese Richtung ermöglichen, bevorzugt. Abbildung 39 zeigt die resultierenden Ridesharing-Zubringer-Verbindungen, Abbildung 40 die im Planungsraum festgelegten Ridesharing-Haltepunkte (für direktes Ridesharing und Ridesharing als Zubringer) sowie Zu- und Abgangswege zu diesen.

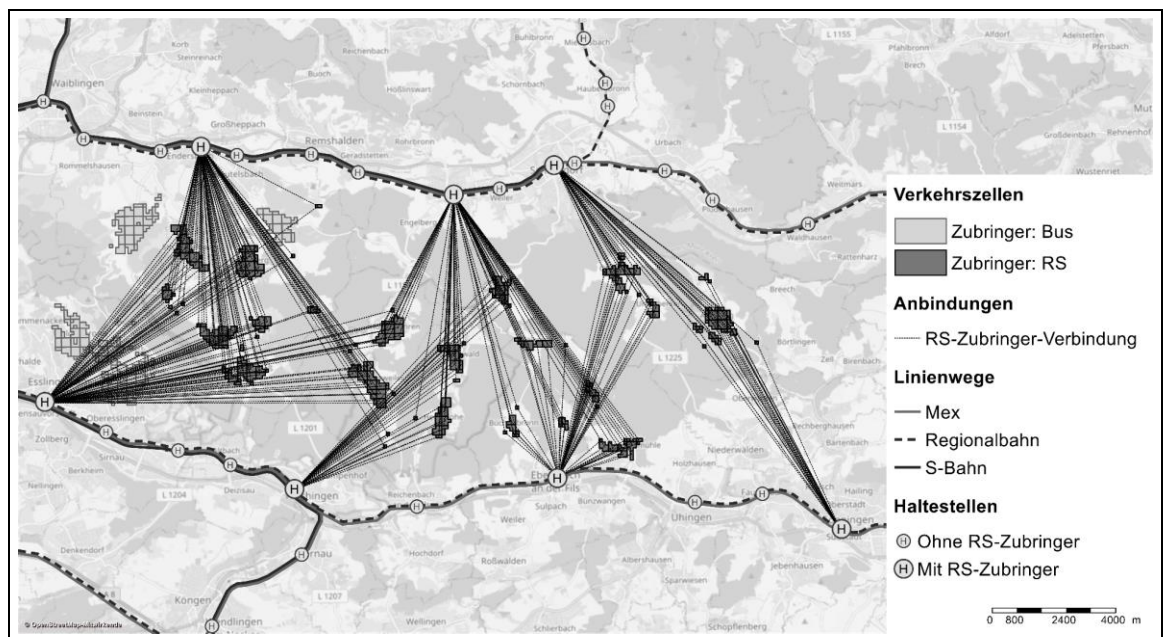


Abbildung 39: Ridesharing-Zubringer-Verbindungen im Anwendungsfall Schurwald (nach RICHTER ET AL. (2021)).

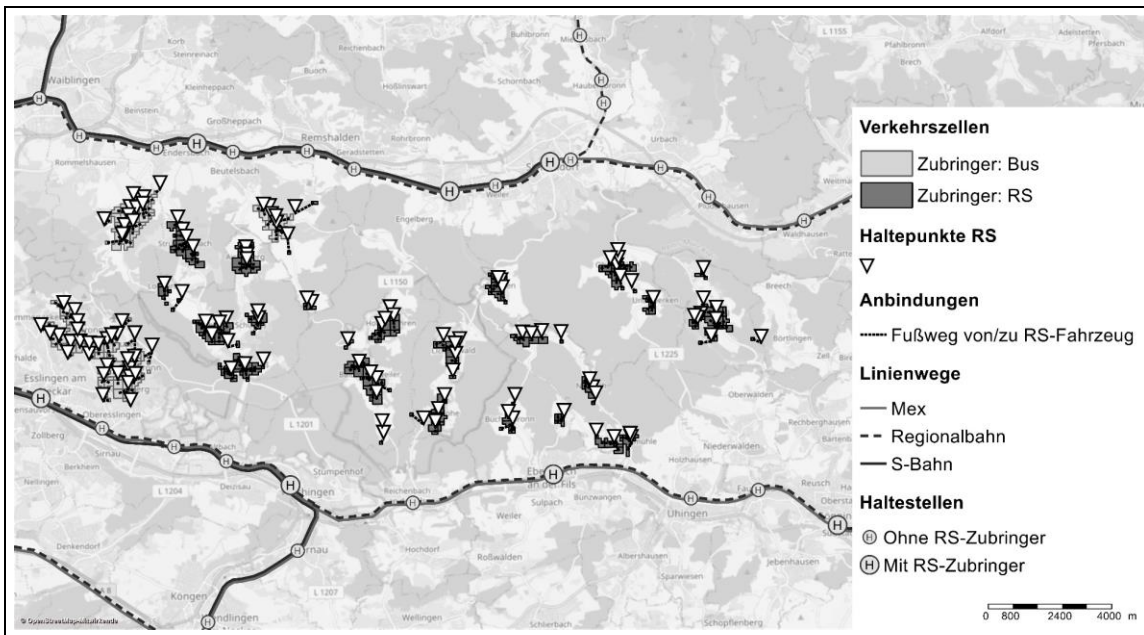


Abbildung 40: Ridesharing-Haltepunkte sowie Zu- und Abgangswege im Anwendungsfall Schurwald für Szenarien mit maximaler Zu- und Abgangsweite von 500 Meter Luftlinie (nach RICHTER ET AL. (2021)).

Um einen genaueren Einblick in die durch die Integration von Ridesharing erfolgten Änderungen des ÖV-Angebots zu erhalten, haben RICHTER ET AL. (2021) elf Relationen unterschiedlicher Natur näher betrachtet. Die untersuchten Relationen sind in Abbildung 41 grafisch dargestellt, Tabelle 14 enthält die untersuchten Kenngrößen. Wie RICHTER ET AL. (2021) erläutern, sind im Vergleich zum Bezugsfall ohne Ridesharing auf allen Relationen mindestens geringe Attraktivitätssteigerungen des ÖV zu verzeichnen. Diese Attraktivitätssteigerungen sind vor allem auf die erhöhte Bedienungshäufigkeit und, im Fall von SW-Ost, die verringerte Zugangszeit zurückzuführen. Insbesondere für Relationen des Binnenverkehrs des Planungsraums können die Umsteigehäufigkeit und damit verbundene Wartezeiten verringert werden. (RICHTER ET AL. (2021))

Die Attraktivitätssteigerung des ÖV durch Integration von Ridesharing wird im Wesentlichen durch zwei Faktoren limitiert. Zum einen muss beim Umstieg von Ridesharing-Zubringer-Fahrten zu fahrplangebundenen Verkehrsmitteln mittels der angesetzten Umsteigewartezeit ein Puffer eingeplant werden, um Schwankungen in der Fahrtzeit zu berücksichtigen. Dadurch kommt es auf Relationen mit im Bezugsfall sehr gut aufeinander abgestimmten Bus- und S-Bahn-Fahrplänen zu einer Erhöhung der Umsteigewartezeit. Zum anderen wird die Bedienungshäufigkeit der Verbindungen mit Ridesharing-Zubringern durch die Bedienungshäufigkeit der fahrplangebundenen Verkehrsmittel an erreichbaren Umsteigepunkten begrenzt. (RICHTER ET AL. (2021))

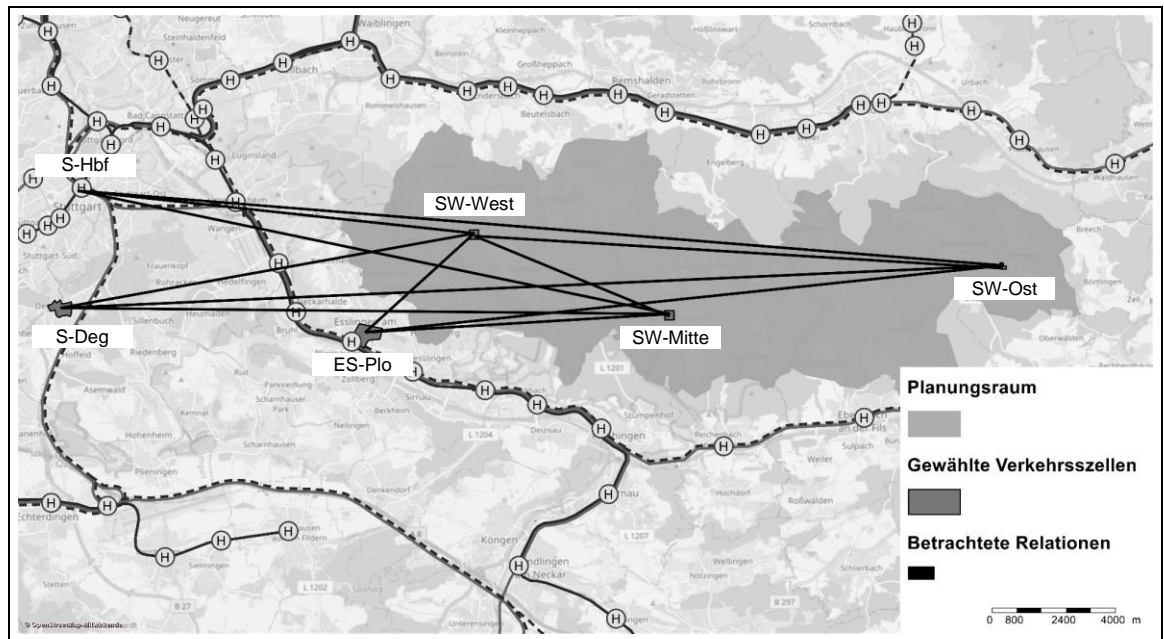


Abbildung 41: In Bezug auf ÖV-Angebotsänderungen untersuchte Relationen (nach RICHTER ET AL. (2021)).

Von	Nach	Art des RS	Mittlere Reisezeit ÖV		Differenz mittlerer ÖV-Kenngrößen S01-S00				
			S00	S01	Zu- & Abgangszeit	Umsteigewarte- & -gezeit	Fahrtzeit im Fahrzeug*	Umsteige- häufigkeit	Bedienungs- häufigkeit** [Abfahrten/Tag]
SW-West	ES-Plo	Direkt	49 min	33 min	-3 min	-10 min	-3 min	-1,2	+92
SW-Mitte	ES-Plo	Direkt	30 min	26 min	-5 min	0 min	+1 min	0,0	+92
SW-Ost	ES-Plo	Direkt	81 min	48 min	-23 min	-8 min	-2 min	-1,0	+69
SW-West	S-Deg	Zubr.	71 min	71 min	-0 min	-1 min	+1 min	-0,3	+93
SW-Mitte	S-Deg	Zubr.	73 min	71 min	+0 min	+1 min	-3 min	-0,0	+47
SW-Ost	S-Deg	Zubr.	109 min	87 min	-20 min	+1 min	-3 min	+0,0	+54
SW-West	S-Hbf	Zubr.	53 min	55 min	0 min	+1 min	+1 min	-0,3	+93
SW-Mitte	S-Hbf	Zubr.	55 min	53 min	0 min	+2 min	-4 min	0,0	+57
SW-Ost	S-Hbf	Zubr.	90 min	71 min	-20 min	+3 min	-2 min	0,0	+59
SW-West	SW-Mitte	Direkt	33 min	22 min	0 min	-7 min	-4 min	-1,4	+93
SW-West	SW-Ost	Direkt	112 min	53 min	-20 min	-19 min	-20 min	-2,5	+93

* Für die Ridesharing-Fahrtzeitanteile wird hier von einem Umwegfaktor von 1,3 zum direkten Weg ausgegangen.
 ** Für direktes Ridesharing wird von einer theoretischen Bedienungshäufigkeit von 96 Abfahrten/Tag ausgegangen (entsprechend einer maximalen Wartezeit von 15 min).

Tabelle 14: ÖV-Kenngrößen ausgewählter Relationen im Anwendungsfall Schurwald für den Bezugsfall S00 und das Szenario S01 mit in den ÖV integriertem Ridesharing (RICHTER ET AL. (2021)).

6.4 Zwischenfazit und Bewertung

Durch die Integration von Ridesharing in den ÖV kann die ÖV-Angebotsqualität insbesondere in Bezug auf die Bedienungshäufigkeit, Umsteigehäufigkeiten und Zu- und Abgangszeiten verbessert werden. Für Ridesharing als Zubringer wird die Attraktivitätssteigerung jedoch durch den systemimmanenten Umstieg, Fahrzeitschwankungen und die Festlegung der Bedienungshäufigkeit durch die erreichbaren fahrplangebundenen Verkehrsmittel begrenzt.

Im Sinne dessen, dass eine direkte Konkurrenz zwischen fahrplangebundenem Verkehr und in den ÖV integriertem Ridesharing nicht wünschenswert ist, wird eine Modellierungsmethode vorgestellt und angewendet, die auf der räumlichen Trennung dieser Angebotsformen beruht. Eine zeitliche Trennung der Angebotsformen könnte mittels tageszeitspezifischer Kenngrößen und entsprechender Berechnung von Ziel- und Moduswahl umgesetzt werden.

Die Begrenzung und damit Festlegung angebotener Ridesharing-Verbindungen und der Haltestellen, die den Umstieg von Ridesharing-Zubringern zu fahrplangebundenen Verkehrsmitteln ermöglichen, stellen zentrale Stellschrauben des ÖV-Angebots dar. Um das ÖV-Angebot durch Ridesharing zu verbessern ohne den bestehenden fahrplangebundenen Verkehr übermäßig zu schwächen, sollte Ridesharing nicht ohne Restriktionen angeboten werden. Ferner sollte vor einer praktischen Umsetzung geprüft werden, ob infrastrukturseitige Voraussetzungen, beispielsweise ausreichend Halteplätze für zeitgleich eintreffende Ridesharing-Zubringer an Umsteigepunkten, vorhanden sind oder geschaffen werden könnten. Integriert in ein Verkehrsnachfragemodell ermöglicht die vorgestellte Methodik die Untersuchung dieser Fragestellungen mittels Szenarienberechnungen, sodass Ridesharing vorausschauend umgesetzt und in den ÖV eingefügt werden kann.

7 Fallstudie im erweiterten Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart

Die im Folgenden betrachtete Fallstudie ist dem Projektbericht von RICHTER ET AL. (2021) entnommen. Aufbauend auf den in Kapitel 3.3 erläuterten grundlegenden Anpassungen des Verkehrsnachfragemodells der Region Stuttgart wird in den folgenden Kapiteln 7.1 und 7.2 auf die untersuchte Aufgabenstellung und die gerechneten Szenarien eingegangen. Zudem wird in Bezug auf diese Arbeit genannt, welche Modellierungsmethoden zur Berechnung genutzt wurden. Kapitel 7.3 bis 7.5 enthalten ausgewählte Ergebnisse der Szenarienrechnungen in Bezug auf nachfrage- und betriebsseitige Auswirkungen sowie eine Auswertung ridesharingspezifischer Kenngrößen.

7.1 Aufgabenstellung und Planungsraum

Der Planungsraum Schurwald wird im Norden und Süden je durch Linienwege des schienengebundenen Verkehrs begrenzt (vgl. Abbildung 5, S. 51). Im Schurwald selbst wird der öffentliche Nahverkehr ausschließlich durch Busse geleistet. Insgesamt leben im rund 125 Quadratkilometer großen Planungsraum etwa 50.000 Einwohner. Etwa 10 Prozent der werktätlich zurückgelegten Wege werden mit dem ÖV zurückgelegt. Das entspricht etwa 15.000 ÖV-Wegen. Etwa 90 Prozent der ÖV-Wege verlassen den Planungsraum, ein Großteil verläuft aus oder in Richtung Stuttgart. Für eine detailliertere Schilderung siehe RICHTER ET AL. (2021).

Untersuchungsziel der von RICHTER ET AL. (2021) durchgeführten Studie ist es, die Wirkungen eines in den ÖV integrierten Ridesharingangebots abzuschätzen, das im Schurwald den Busverkehr teilweise oder vollständig ersetzt und so unter anderem als Zubringer zum schienengebundenen Verkehr im Norden und Süden des Planungsraums dient.

7.2 Szenarien und gewählte Berechnungsmethode

Von RICHTER ET AL. (2021) werden drei Szenarien S01 bis S03 berechnet, die im Vergleich zum Bezugsfall S00 (vgl. Kapitel 3.3) und untereinander ausgewertet und interpretiert werden. Tabelle 15 gibt eine Übersicht über die Szenariendefinition. In S01 und S02 werden jeweils alle Buslinien, die primär den Schurwald bedienen, durch Ridesharing mit einer maximalen Wartezeit von 15 Minuten ersetzt. Die beiden Szenarien unterscheiden sich in der maximalen Luftlinienweite, die als Zu- und Abgangsweite zum/vom Ridesharingfahrzeug akzeptiert wird. Die sehr geringe akzeptierte Weite von 150 Meter in S02 spiegelt eine Abholung der Fahrgäste direkt vor der Haustür wieder. S03 stellt eine Kombinationslösung aus klassischem ÖV und Ridesharing dar, in der das Ridesharingangebot aus S01 teilweise durch drei zentral geführte und ganztägig im 15-Minuten-Takt verkehrende Buslinien ersetzt wird. Als ganztägig wird in diesem Zusammenhang

ein Busangebot von 05:00 Uhr bis 24:00 Uhr angesehen. Zudem wird Ridesharing in S03 lediglich mit einer maximalen Wartezeit von 30 Minuten angeboten. Die hohe Individualisierung des ÖV in S01 und besonders in S02 wird somit in S03 wieder etwas zurückgenommen. (RICHTER ET AL. (2021))

	Szenario	Fahrplan-fahrten Bus (ca.)	Wartezeit Ridesharing	Zugangs- weite Ridesharing (Luftlinie)	Anzahl Ridesharing- Haltepunkte	Ø Zu-/Ab- gangszeit im ÖV je Ver- kehrszelle
S00	Bezugsfall	1.500 Fahrten 15.500 km	-	Bus: ≤ 1,7 km	-	8,0 min
S01	RS 15' mit Haltestellen	900 Fahrten 7.000 km	< 15 min	≤ 0,5 km	126	5,7 min
S02	RS 15' bis zur Haustür	wie S01	< 15 min	≤ 0,15 km	277	2,8 min
S03	Bus + RS 30' mit Haltestellen	S01 + 3 Bus- Linien 15'	< 30min	≤ 0,5 km	126 (+ 74 Bus- Haltestellen)	5,8 min

Tabelle 15: Übersicht zu den in der Fallstudie berechneten Szenarien. Die Werte beziehen sich auf den Planungsraum. (nach RICHTER ET AL. (2021))

In allen Szenarien werden darüber hinaus die folgenden Annahmen zu Ridesharingangeboten getroffen (RICHTER ET AL. (2021)):

- Fahrpreis: Sowohl direktes als auch Ridesharing als Zubringer wird zum gleichen Tarif wie der fahrplangebundene ÖV im Bezugsfall angeboten.
- Fahrzeugkapazität: 6 Fahrgäste.
- Bündelungsregeln: Es wird immer ein Umweg von bis zu 10 Minuten in Kauf genommen. Wird dieser Wert überstiegen, darf der Umweg maximal zu einer Verdopplung der Fahrtzeit für bereits mitfahrende Personen führen.
- Einstiegszeit und Haltedauer je Fahrgast: Werden in dieser Fallstudie nicht berücksichtigt und betragen daher jeweils 0 Minuten.
- Umlaufbildung: Die Umlaufbildung erfolgt unter der Prämisse einer möglichst geringen Fahrzeuganzahl. Es erfolgt keine Begrenzung der Leerfahrtdauer.
- Ridesharing-Zubringer: Die Umsteigegeh- und -wartezeiten zu/von Schienenverkehrsmitteln werden einheitlich mit 3 Minuten und 5 Minuten festgelegt.

Um die Verkehrsnachfrage der Szenarien zu berechnen, wurden die Berechnungsmethoden der verschiedenen Bereiche entsprechend den Erläuterungen dieser Arbeit wie folgt gewählt:

- Modellstruktur: Zum einen wird der Berechnungsablauf des Bezugsfalls um Schritte zur Abbildung betrieblicher Entscheidungsprozesse erweitert. Diese Schritte werden nicht in den Rückkopplungsprozess zwischen Angebotsqualität und Verkehrsnachfrage eingebunden, da der Einfluss der generierten Ridesharing-Fahrzeugfahrten auf

auslastungsabhängige Pkw-Fahrtzeiten als gering angenommen wurde und der Rechenzeitgewinn sehr hoch ist. Das bedeutet, dass die Ziel- und Moduswahl auf von Ridesharing-Fahrzeugfahrten unabhängig berechneten Pkw-Fahrtzeiten und einem mit 1,3 einheitlich angenommenem Umwegfaktor zur Mitnahme weiterer Ridesharing-fahrgäste beruht. Zum anderen wird Ridesharing als Teil des ÖV in die Verkehrsmittel- und Verbindungswahl integriert.

- Abbildung betrieblicher Entscheidungsprozesse: Für Bündelung und Umlaufbildung wird die Ridesharing-Personennachfrage auf ganzzahlige Werte gerundet (entspr. Kapitel 4.4). Der verwendete Bündelungsalgorithmus entspricht der in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Methode mit Rampenfunktion zur Bestimmung der benötigten Fahrzeuglastfahrtanzahl und routenspezifischen Restkapazitäten. Als Umlaufbildungsalgorithmus dient der in Kapitel 4.3 vorgestellte Ansatz von HARTLEB ET AL. (2021) ohne Begrenzung der maximalen Leerfahrtdauer.
- Erweiterung der Moduswahl: Es finden keine Anpassungen der Nutzenfunktionen der Ziel- und Moduswahl statt. Das heißt, es wird angenommen, dass die Wahrnehmung der Attribute des ÖV, wie beispielsweise Fahrtzeit im Fahrzeug, im Vergleich zum Bezugsszenario unverändert ist.
- Erweiterung der Verkehrsmittel- und Verbindungswahl im ÖV: Entsprechend der in den Kapiteln 6.2 und 6.3 erläuterten Methodik, werden die Angebote des fahrplangebundenen ÖV und Ridesharing räumlich getrennt. Ridesharing-Zubringer werden in die fahrplanbasierte Umlegung integriert. Analog zur Ziel- und Moduswahl wird auch hier keine Änderung der Wahrnehmung der Fahrtzeit im Fahrzeug etc. implementiert.

7.3 Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage und Fahrleistung

Im Folgenden werden die zentralen von RICHTER ET AL. (2021) erläuterten verkehrlichen Wirkungen der Einführung der Ridesharingangebote entsprechend der Szenarien S01 bis S03 zusammengefasst. Die Auswertungen umfassen die Moduswahl, die Verkehrsmittelwahl im ÖV sowie die aus Ridesharingfahrten und Fahrten mit privaten Pkw resultierende Fahrleistung.

7.3.1 Modal-Split

Nachfragebezogene Auswirkungen der Einführung von Ridesharing im Schurwald lassen sich am Modal-Split erkennen. Der Modal-Split kann anhand der Verkehrsleistung, also zurückgelegten Personenkilometern je Modus, oder anhand des Verkehrsaufkommens in Form der Anzahl der Personenwege je Modus berechnet werden. Der wegebezogene Modal-Split des Quell-, Ziel- und Binnenverkehrs des Planungsraums lässt eine deutliche Zunahme des ÖV-Anteils erkennen: In S00 liegt der Anteil der etwa 170.000 mit dem ÖV zurückgelegten Personenwege bei 9 Prozent. In S01 steigt dieser Anteil auf

15 Prozent, in S02 liegt er aufgrund der kürzeren Zu- und Abgangsweiten zum Ridesharing mit 17 Prozent nochmals höher. In S03 wird ein ÖV-Anteil von 13 Prozent erreicht. (RICHTER ET AL. (2021))

Auch in Bezug auf den verkehrsleistungsbezogenen Modal-Split lässt sich eine deutliche Zunahme des ÖV-Anteils sowohl im Quell-, Ziel- und Binnenverkehr (Abbildung 42) als auch im reinen Binnenverkehr (Abbildung 43) erkennen. Der quell-, ziel- und binnenverkehrsbezogene ÖV-Anteil beispielsweise steigt von 12 Prozent aller zurückgelegten Personenkilometer in S00 auf 21 bzw. 22 Prozent in S01 und S02 sowie 18 Prozent in S03 (Abbildung 42). Sowohl die Anteile als auch die absolute Verkehrsleistung aller anderen Modi gehen zurück. (RICHTER ET AL. (2021))

Neben Änderungen in der Moduswahl kommt es auch zu Änderungen in der Zielwahl. Da die Erreichbarkeit von Aktivitätenorten durch Ridesharing verbessert wird, erhöht sich die mittlere Reiseweite in den untersuchten Szenarien im Vergleich zum Bezugsfall. Bezogen auf den Quell-, Ziel und Binnenverkehr des Schurwalds erhöht sich die mittlere Reiseweite der zurückgelegten Wege in S01 um 4 Prozent, in S02 um 5 Prozent und in S03 um 3 Prozent. Besonders deutlich wird der Einfluss auf die Zielwahl bei Betrachten der Verkehrsleistung des Binnenverkehrs des Schurwalds (Abbildung 43). Da Ziele im Schurwald besser erreichbar sind, werden sie attraktiver. Personen sind folglich bereit weitere Strecken im Schurwald zurückzulegen und damit steigt die gesamte Verkehrsleistung im Binnenverkehr des Schurwalds in allen Szenarien. Obwohl die relative Zunahme von Personenkilometern im ÖV in allen Szenarien im Vergleich zum Bezugsfall sehr hoch ist, bleibt die Verkehrsleistung im Pkw-Verkehr nahezu konstant. (RICHTER ET AL. (2021))

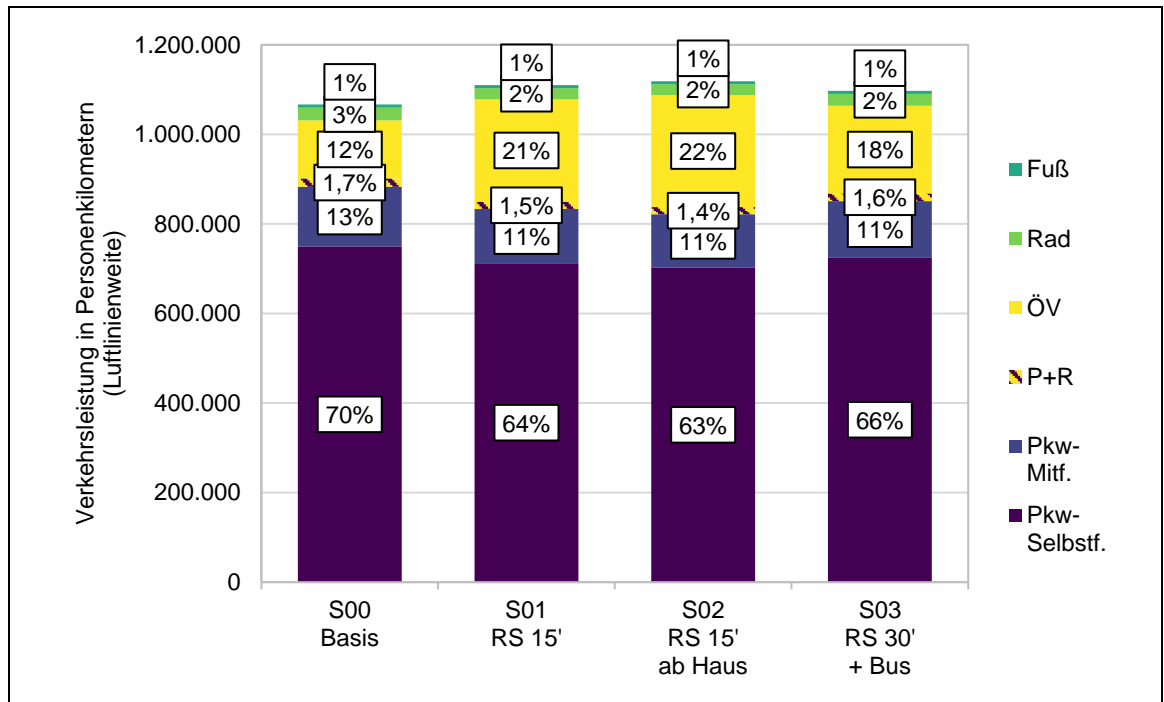


Abbildung 42: Verkehrsleistungsbezogener Modal-Split für Wege des Quell-, Ziel- und Binnenverkehrs des Schurwalds je Szenario (RICHTER ET AL. (2021)).

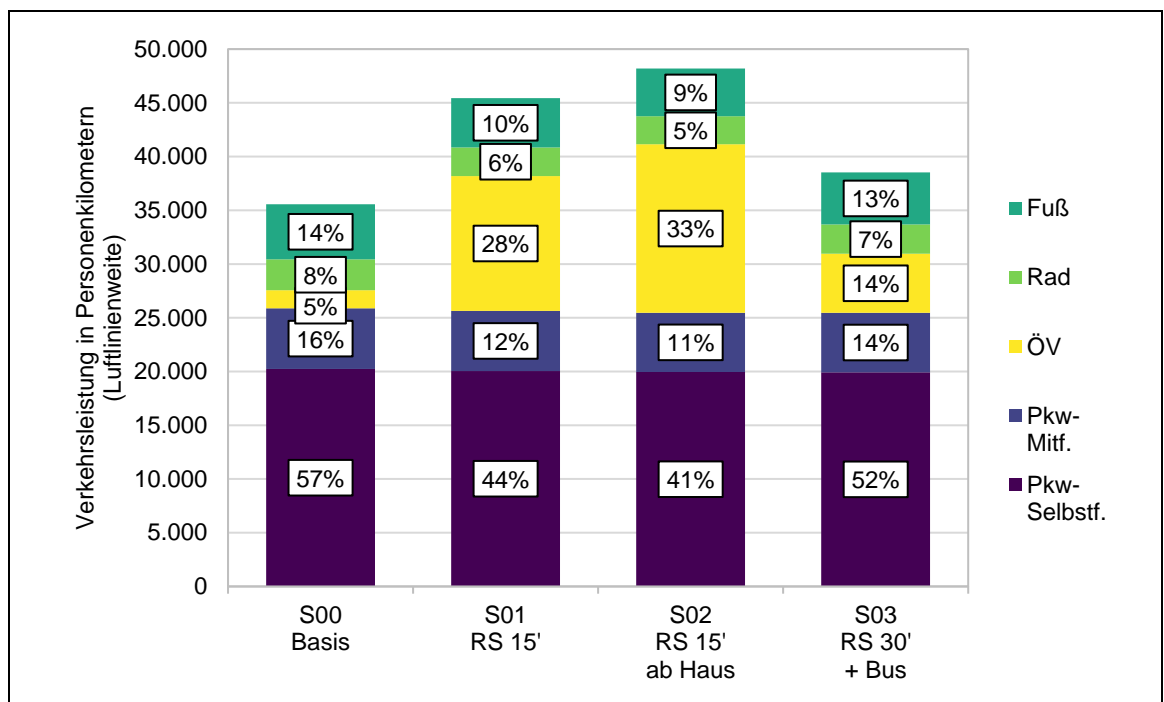


Abbildung 43: Verkehrsleistungsbezogener Modal-Split für Wege des Binnenverkehrs im Schurwald (RICHTER ET AL. (2021)).

7.3.2 Verkehrsmittelwahl im ÖV und Einfluss des ÖV-Angebotstyps

Abbildung 44 und Abbildung 45 geben die wegebezogene Verkehrsmittelwahl im ÖV je Szenario wieder. In S03 erhöht sich im Quell-, Ziel- und Binnenverkehr im Vergleich zu S00 die Anzahl der Personenfahrten, die ein fahrplangebundenes Verkehrsmittel nutzen. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die großen Zuwächse im ÖV in den Szenarien S01 und S02 insbesondere durch direktes Ridesharing bedient werden. (RICHTER ET AL. (2021))

Um den Einfluss der Änderungen des ÖV-Angebots besser einschätzen zu können, wird der verkehrsaufkommensbezogene Modal-Split für Personenwege des Quell-, Ziel- und Binnenverkehrs in S00 und S01 vertiefend betrachtet. Hierbei werden die Relationen entsprechend ihrer ÖV-Angebotstypen (vgl. Tabelle 13, S. 120) gruppiert. Diese in Abbildung 46 dargestellte Auswertung zeigt, dass sich die Moduswahl auf den Relationen ändert, auf denen anstelle des fahrplangebundenen ÖV ein Ridesharingangebot verfügbar ist. Auf Relationen mit direktem Ridesharing ist der Zuwachs des ÖV-Anteils (7 Prozent in S00 zu 22 Prozent in S01) höher als auf Relationen mit Ridesharing als Zubringer (8 Prozent in S00 zu 16 Prozent in S01). Das spiegelt die durch den Anschluss an fahrplangebundene Verkehrsmittel begründete Begrenzung der Attraktivität von Ridesharing-Zubringern im Vergleich zu direktem Ridesharing wieder. (RICHTER ET AL. (2021))

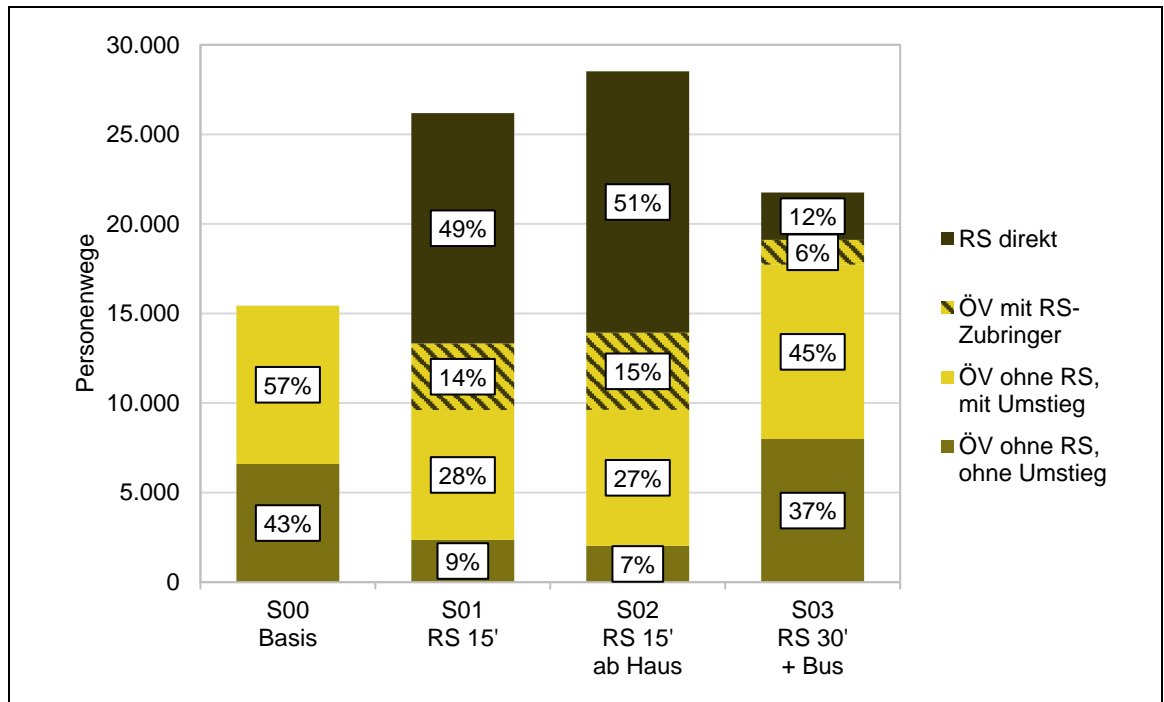


Abbildung 44: Verkehrsmittelwahl je Personenweg im ÖV für Wege des Quell-, Ziel- und Binnenverkehrs des Schurwalds (RICHTER ET AL. (2021)).

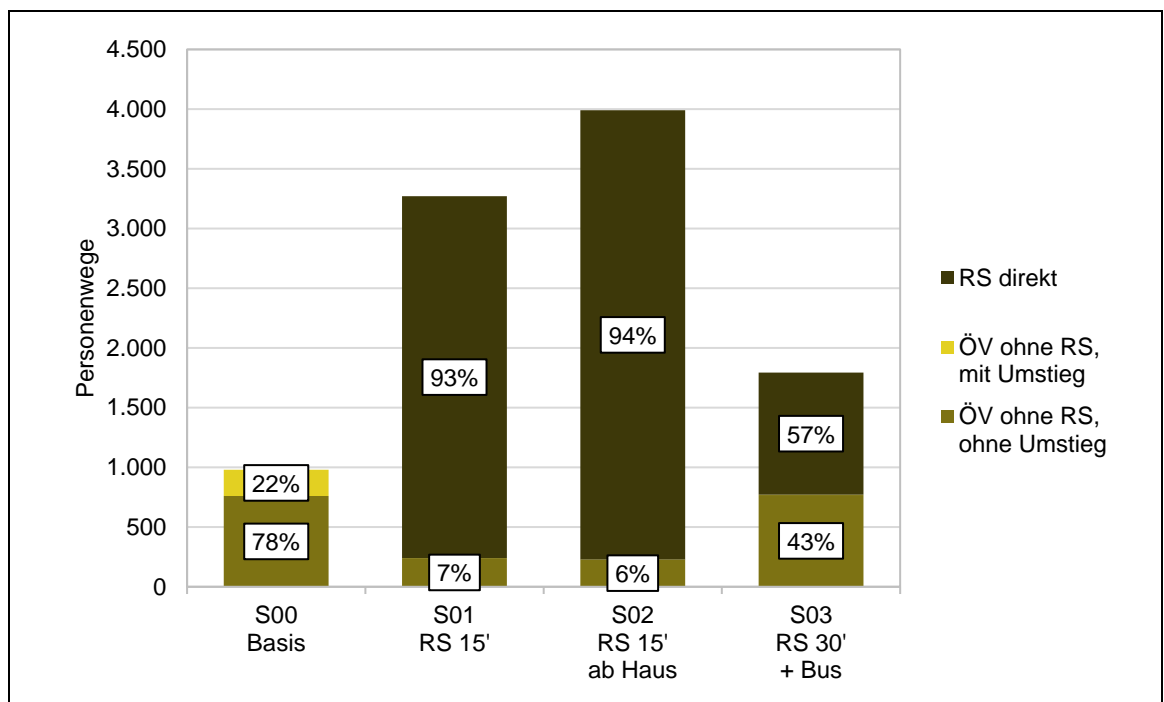


Abbildung 45: Verkehrsmittelwahl je Personenweg im ÖV für Wege des Binnenverkehrs des Schurwalds (RICHTER ET AL. (2021)).

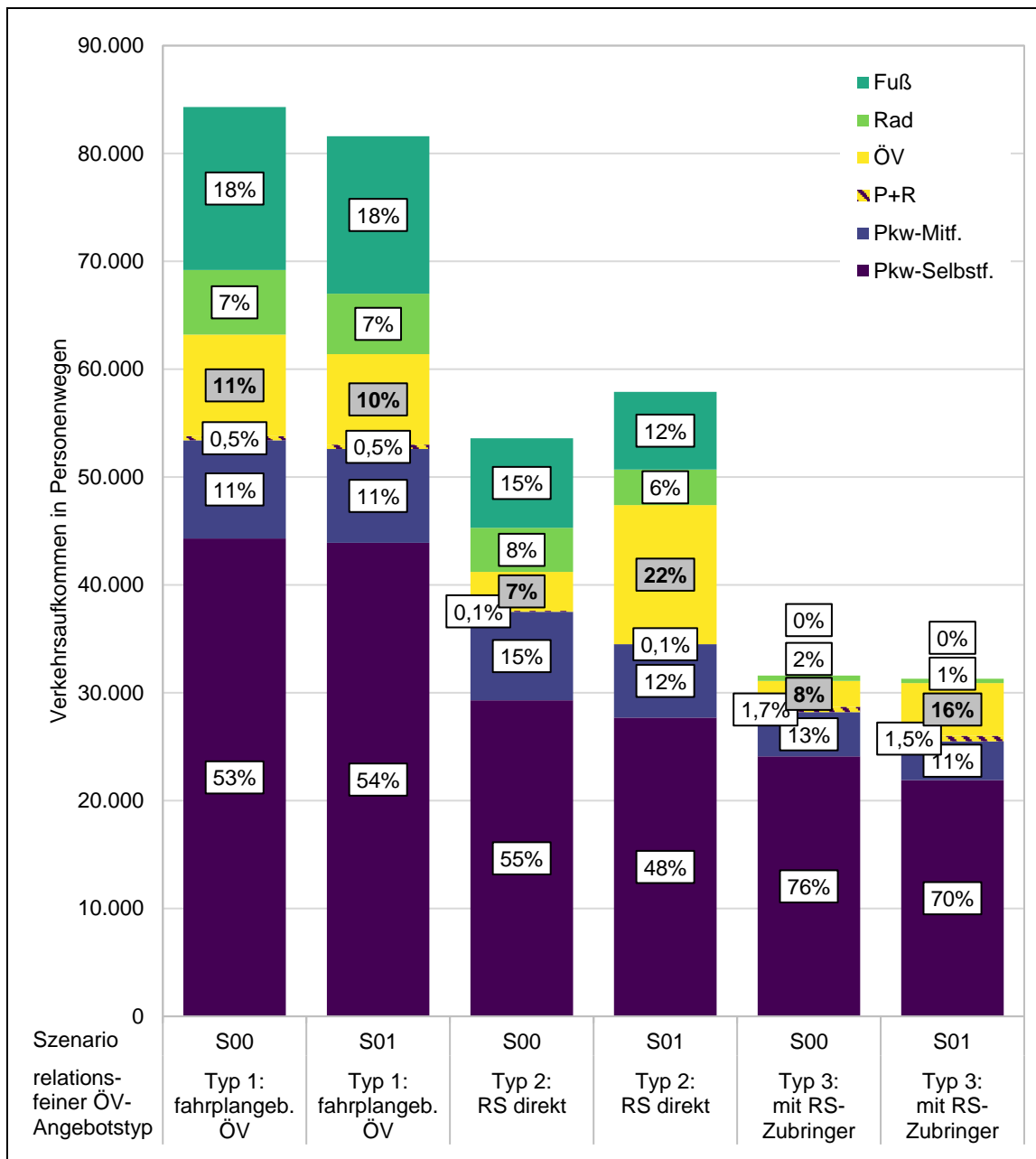


Abbildung 46: Verkehrsaufkommensbezogener Modal-Split für Personenwege des Quell-, Ziel- und Binnenverkehrs des Schurwalds im Bezugsfall S00 und Szenario S01 (RS 15') je relationsspezifischem ÖV-Angebotstyp (RICHTER ET AL. (2021)). ÖV-Anteil ist grau hinterlegt.

7.3.3 Fahrleistung

Dass eine Zunahme des Anteils der mit dem ÖV zurückgelegten Personenwege nicht gleichbedeutend ist mit einer Abnahme der Fahrleistung auf den Straßen, zeigt sich bei Betrachtung der durch private Pkw und Ridesharingfahrzeuge erzeugten Fahrzeugkilometer in Quell-, Ziel- und Binnenverkehr (Abbildung 47) bzw. ausschließlich Binnenverkehr des Planungsraums (Abbildung 48). Im Quell-, Ziel- und Binnenverkehr reicht der

Rückgang der Pkw-Kilometer nicht aus, um die durch Ridesharing erzeugten Fahrzeugkilometer auszugleichen, sodass es in den Szenarien S01 und S02 zu einer Zunahme der Fahrzeugkilometer kommt. In S03 ist ein leichter Rückgang der Fahrzeugkilometer zu verzeichnen. Buskilometer sind an dieser Stelle nicht berücksichtigt (siehe dazu Kapitel 7.4). Da die Pkw-Fahrleistung im Binnenverkehr des Schurwalds nahezu unverändert bleibt, aber viele Ridesharingfahrten hinzukommen, steigen die Fahrzeugkilometer in dieser Gruppe mit bis zu 80 Prozent mehr Fahrzeugkilometern in S02 im Vergleich zu S00 stark an. (RICHTER ET AL. (2021))

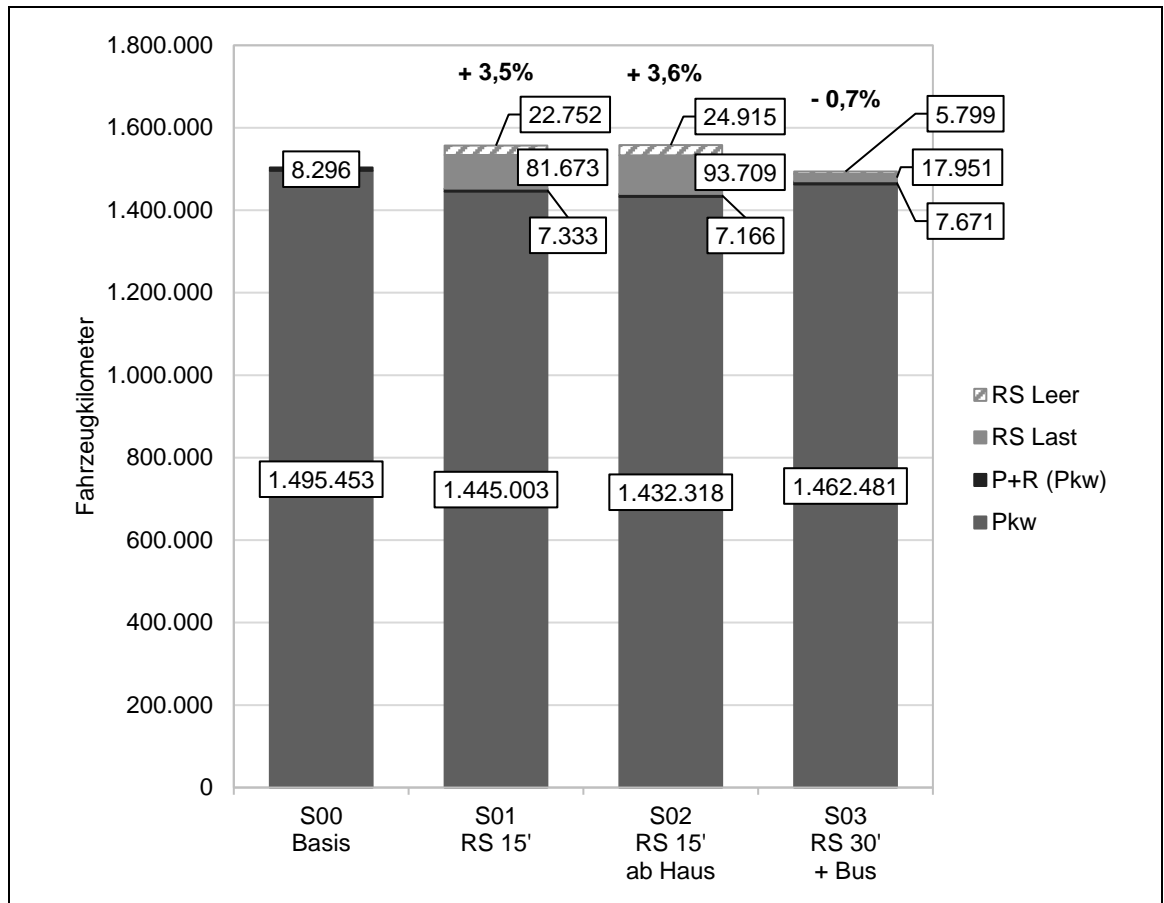


Abbildung 47: Im Quell-, Ziel- und Binnenverkehr des Schurwalds erzeugte Fahrzeugkilometer von Ridesharingfahrzeugen und privaten Pkw (RICHTER ET AL. (2021)).

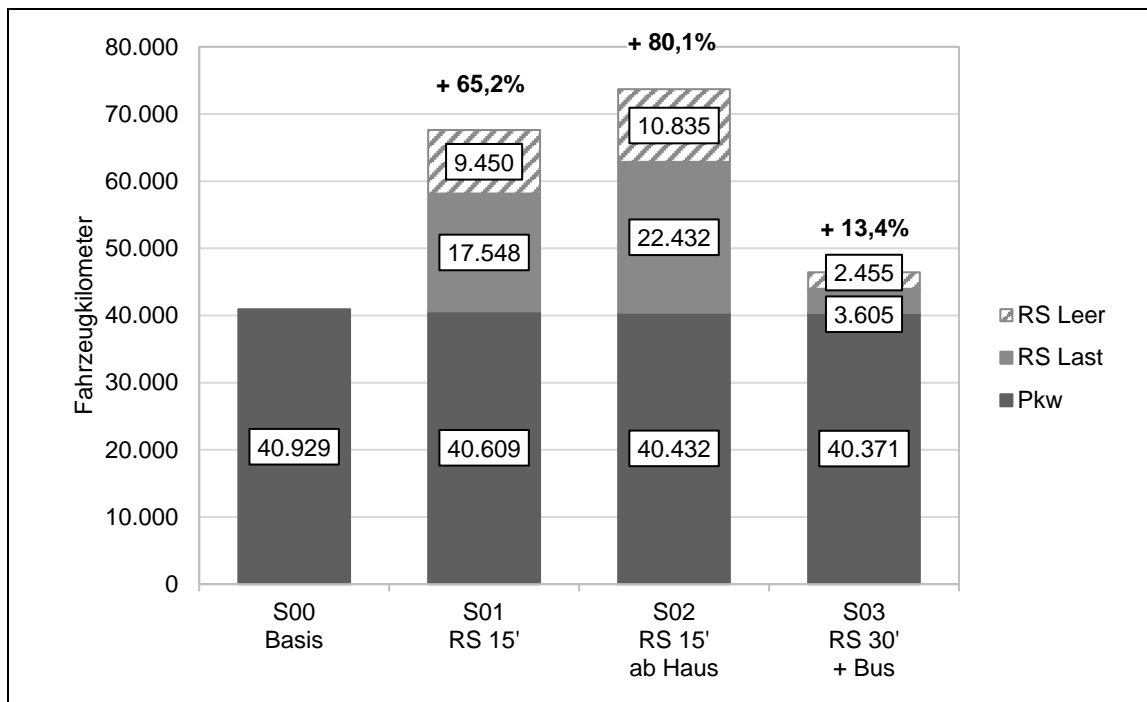


Abbildung 48: Im Binnenverkehr des Schurwalds erzeugte Fahrzeugkilometer von Ridesharingfahrzeugen und privaten Pkw (RICHTER ET AL. (2021)).

Die Betrachtung der räumlichen Verteilung der Fahrzeugfahrten auf Streckenebene zeigt, dass insbesondere Streckenabschnitte im unmittelbaren Umfeld von Ridesharing-Zubringer-Umsteigepunkten hohe relative Verkehrsstärke-Zuwächse auf über das 1,5-fache der Verkehrsstärke in S00 aufweisen. Der Großteil der Strecken im Planungsraum verzeichnet hingegen beispielsweise in S01 einen 2 bis 10 prozentigen Zuwachs bezogen auf das Verkehrsaufkommen in S00. In S02 und S03 sind der aggregierten Auswertung entsprechende Tendenzen zu erkennen. (RICHTER ET AL. (2021))

7.4 Auswirkungen auf den Betrieb

Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse der Auswertung von RICHTER ET AL. (2021) zu betrieblichen Wirkungen der Einführung des ÖV-Angebots entsprechend den Szenarien S01 bis S03 im Vergleich zum Basisfall S00 zusammengestellt. Dies beinhaltet Berechnungen zu benötigter Flottengröße und -einsatz sowie zu daraus entstehenden Kosten, Emissionen und Energieaufwand.

7.4.1 Flottengröße und Fahrzeugeinsatz

Abbildung 49 zeigt die benötigte Flottengröße und die Einsatzkilometer aufgeschlüsselt nach Bus- und Ridesharingfahrzeugflotte je Szenario und im Bezugsfall. Die Anzahl benötigter Ridesharingfahrzeuge und deren Einsatzkilometer ergeben sich in Abhängigkeit

der Ridesharingnachfrage (siehe Kapitel 4). Die Busanzahl sowie deren Einsatzkilometer werden durch die zu bedienenden Fahrplanfahrten im Planungsraum festgelegt. Die Einsatzkilometer zeigen eine ähnliche Tendenz wie die im ÖV zurückgelegten Personenkilometer je Szenario (vgl. Abbildung 42 und Abbildung 43, S. 129). Busse sind effizienter darin Personen zu befördern als Ridesharingfahrzeuge. Durch das eingeführte Ridesharingangebot und die damit verbundene Attraktivitätssteigerung des ÖV wird die hohe Personennachfrage, die dann in Form von Einsatzkilometern abgearbeitet wird, jedoch auch erst erreicht.

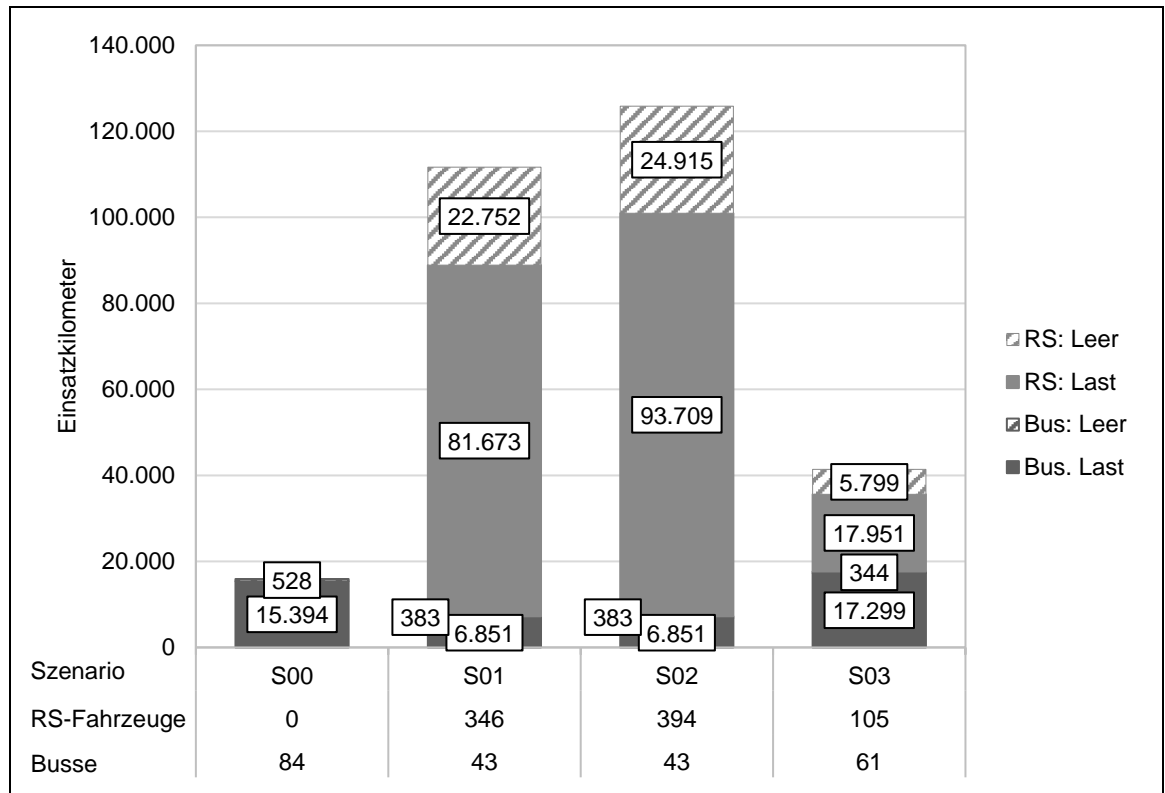


Abbildung 49: Einsatzkilometer (Graph) und benötigte Fahrzeuganzahl (Tabelle) je Szenario (nach RICHTER ET AL. (2021)).

In den Szenarien S01 und S02 werden aufgrund der entfallenden Buslinien 21 Busse weniger benötigt als in S00 (vgl. Abbildung 49). Diese werden jedoch durch 346 bzw. 394 Ridesharingfahrzeuge kompensiert. Da Ridesharingfahrzeuge mit nur 6 Fahrgästen je Fahrzeug eine deutlich geringere Kapazität als Linienbusse aufweisen und zudem individuellere Fahrtwünsche bedienen, ist der Zuwachs in Form von Ridesharingfahrzeugen besonders hoch. Für die in S03 eingeführten Buslinien kommen 18 zusätzliche Busse zu den in S01 und S02 benötigten zum Einsatz. Dadurch kann ein Großteil der Ridesharingnachfrage in S01 und S02 in S03 durch den Busverkehr bedient werden, sodass sich die Anzahl benötigter Ridesharingfahrzeuge auf 105 reduziert. (RICHTER ET AL. (2021))

Die Lastfahrkilometer je Fahrzeug und Tag liegen in S01 und S02 jeweils für Ridesharingfahrzeuge mit etwa 240 deutlich höher als für Busse mit etwa 160 Lastfahrkilometern

je Bus und Tag. Lediglich in S03 wird aufgrund des ganztägig (05:00 Uhr bis 24:00 Uhr) angebotenen 15-Minuten-Takts auf drei langen Linienrouten diese durchschnittliche Lastfahrtskilometerzahl je Tag mit 284 Lastfahrtskilometern je Tag und Bus noch überschritten. Aufgrund der höheren Systemgeschwindigkeit werden im Ridesharing trotz der teils höheren durchschnittlichen Lastfahrtskilometeranzahl stets weniger Lastfahrtstunden je Tag und Fahrzeug aufgewandt. (RICHTER ET AL. (2021))

Der durchschnittliche Besetzungsgrad liegt für Ridesharinglastfahrten in allen Szenarien nahezu konstant bei etwa 1,96 Personenkilometern je Lastfahrtskilometer. Der Besetzungsgrad der Buslinien sinkt von 10,32 Personenkilometern je Lastfahrtskilometer in S00 über 9,90 in S01 und 9,88 in S02 auf 9,39 in S03. Der geringe Besetzungsgrad in S03 liegt im ganztägig gefahrenen 15-Minuten-Takt der Buslinien begründet. S01 und S02 zeigen, dass ein attraktives Ridesharingangebot auch bei räumlicher Trennung zum fahrplangebundenen Verkehr einen mindernden Einfluss auf dessen Auslastung haben kann. (RICHTER ET AL. (2021))

7.4.2 Kosten, Emissionen und Energieaufwand

Für die Kosten-, Emissions- und Energieaufwandsberechnungen unterscheiden RICHTER ET AL. (2021) die folgenden drei Kombinationen für Fahr- und Antriebskonzepte der Busse und Ridesharingfahrzeuge:

- Konzept 1: Busse werden mit Diesel-Kraftstoff betrieben, Ridesharingfahrzeuge elektrisch. Beide Fahrzeugarten werden von Fahrpersonal gefahren.
- Konzept 2: Busse werden mit Diesel-Kraftstoff betrieben und von Fahrpersonal gefahren. Ridesharingfahrzeuge werden elektrisch betrieben und fahren voll automatisiert, also fahrerlos.
- Konzept 3: Sowohl Busse als auch Ridesharingfahrzeuge werden elektrisch betrieben und fahren voll automatisiert, also fahrerlos.

Für Erläuterungen zur Berechnungsweise sowie feiner differenzierte Werte als die im Folgenden dargestellten sei auf RICHTER ET AL. (2021) verwiesen.

Abbildung 50 zeigt die berechneten Kosten der ÖV-Fahrzeugflotte pro Tag je Fahrzeugkonzept und Szenario im Vergleich zum Bezugsszenario. In den auf einen Tag bezogenen Kosten sind Kosten für Antrieb, Abnutzung, Reinigung der Fahrzeuge und CO₂-Steuer (in Abhängigkeit der Fahrleistung), Personalkosten für Fahrpersonal, Overhead und Flottenmanagement (in Abhängigkeit der Einsatzdauer) sowie Anschaffung, Versicherung und weitere Steuern berücksichtigt. Unter allen Fahrzeugkonzepten zeigt sich für die Gesamtkosten ein den Einsatzkilometern (Abbildung 49, S. 135) ähnliches Bild. In Szenarien, in denen viel Ridesharing genutzt wird, sind die Gesamtkosten, die für die Fahrzeugflotte anfallen, höher als in den Szenarien, in denen vermehrt Busse zum Einsatz kommen. In Fahrzeugkonzept 1 kommt es in S01 und S02 zu etwa den dreifachen Kosten wie in S00. S03 stellt eine Kombinationslösung aus S00 und den Szenarien S01

und S02 dar, wodurch auch die Kosten zwischen den genannten Szenarien und dem Basisfall liegen. Ein Großteil der Kosten im Ridesharing wird bei Fahrzeugkonzept 1 durch die einsatzdauerabhängigen Kosten für Fahrpersonal generiert. Entfallen diese aufgrund der Automatisierung in Fahrzeugkonzept 2, können die Szenarien S01 und S02 zu etwa doppelt so hohen Kosten wie das Basisszenario betrieben werden. Fahrzeugkonzept 3 verringert vorrangig die Kosten im Basisszenario sowie im Szenario S03, da Kostenverringerungen insbesondere durch entfallende Kosten für Fahrpersonal im Busverkehr begründet sind. (RICHTER ET AL. (2021))

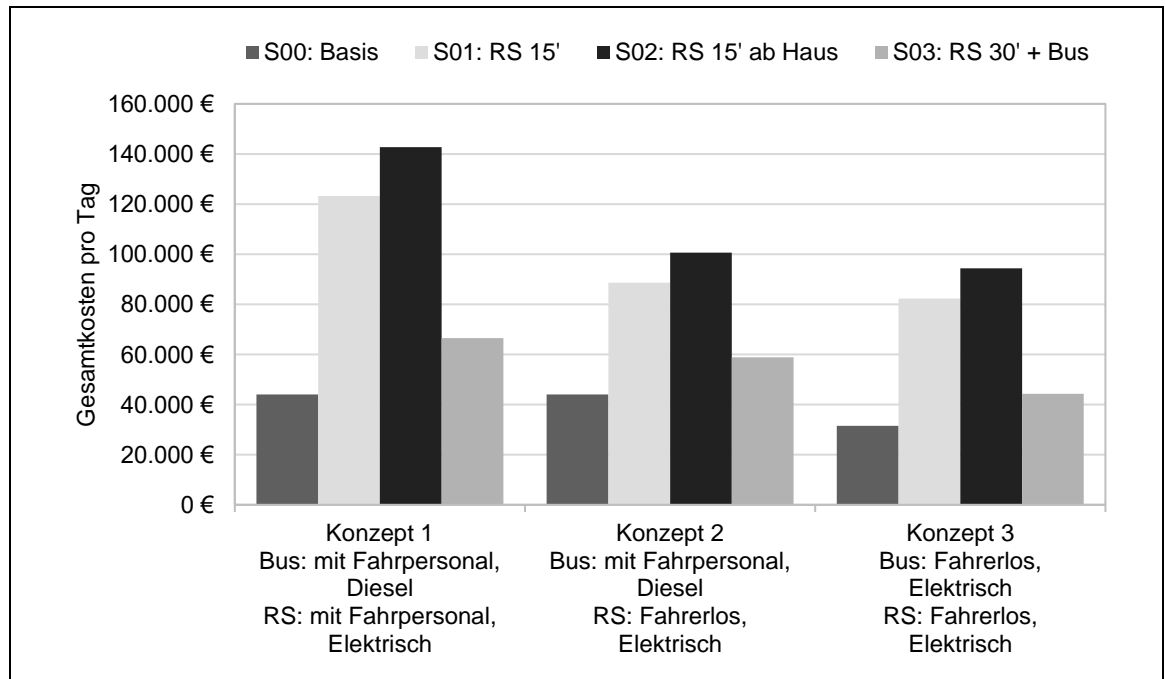


Abbildung 50: Kosten der ÖV-Fahrzeugflotte pro Tag je Fahrzeugkonzept und Szenario (RICHTER ET AL. (2021)).

In Bezug auf den für den Betrieb benötigten Energieaufwand (Abbildung 51) und die erzeugten CO₂-Emissionen (Abbildung 52) wird angenommen, dass der Automatisierungsgrad der Fahrzeuge keine Auswirkungen hat. Bei den Berechnungen wird jeweils die Vorkette, also der Energieaufwand und die Emissionen, die bis zur Bereitstellung des Kraftstoffs bzw. des Stroms anfallen, mitberücksichtigt. Werden sowohl Ridesharingfahrzeuge als auch Busse elektrisch betrieben (Fahrzeugkonzept 3), zeigt sich in beiden Bereichen ein der Kostenbetrachtung ähnliches Bild: Die deutlich höheren Einsatzkilometer der Szenarien führen zu einem höheren Energieaufwand sowie höheren CO₂-Emissionen. Während die Einsatzkilometer in S01 um den Faktor 7,0, in S02 um den Faktor 7,9 und in S03 um den Faktor 2,7 steigen, steigen der Energieaufwand und die CO₂-Emissionen jeweils auf Werte zwischen dem 1,5-fachen (S03) und dem 2,6-fachen (S02) des Bezugsfalls. (RICHTER ET AL. (2021))

Wird angenommen, dass Busse weiterhin mit Diesel betrieben werden und Ridesharingfahrzeuge elektrisch (Fahrzeugkonzept 1 und 2), kommt es insgesamt zu höheren

Energieaufwänden und CO₂-Emissionen als bei Fahrzeugkonzept 3. Durch die Berücksichtigung der Vorkette und die stark erhöhten Einsatzkilometer in den Szenarien S01 und S02, können die betrachteten Werte jedoch nicht merklich gesenkt werden und liegen in ähnlichen Größenordnungen oder sind höher als die des Bezugsfalls. (RICHTER ET AL. (2021))

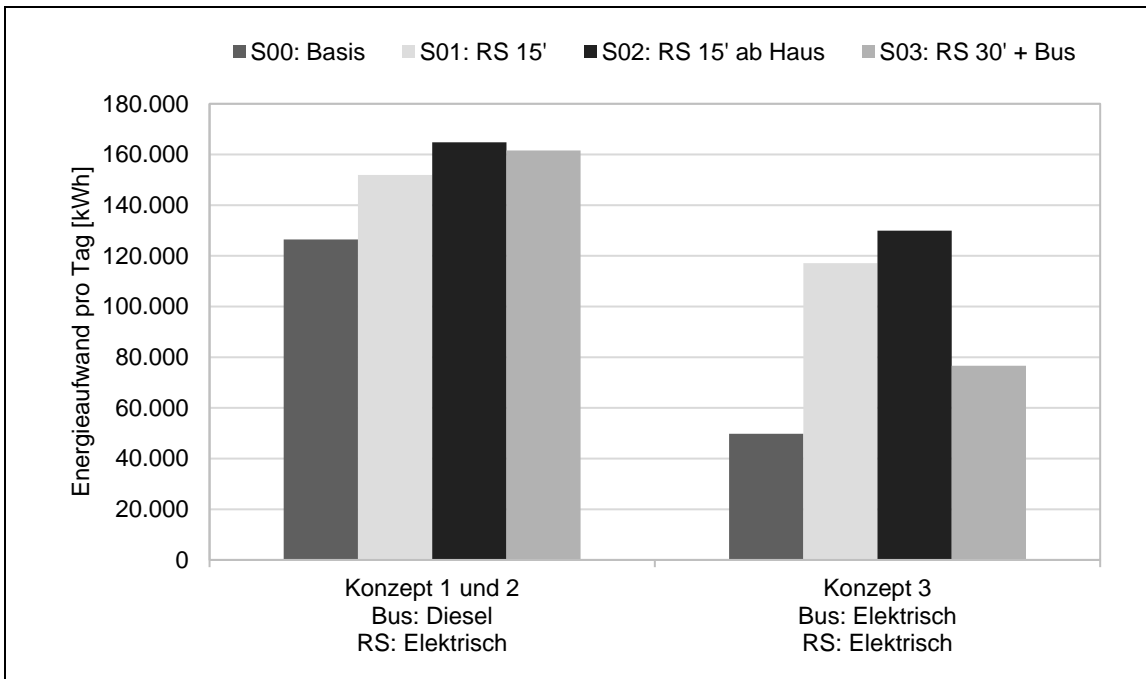


Abbildung 51: Energieaufwand der ÖV-Fahrzeugflotte pro Tag je Fahrzeugkonzept und Szenario (nach RICHTER ET AL. (2021)).

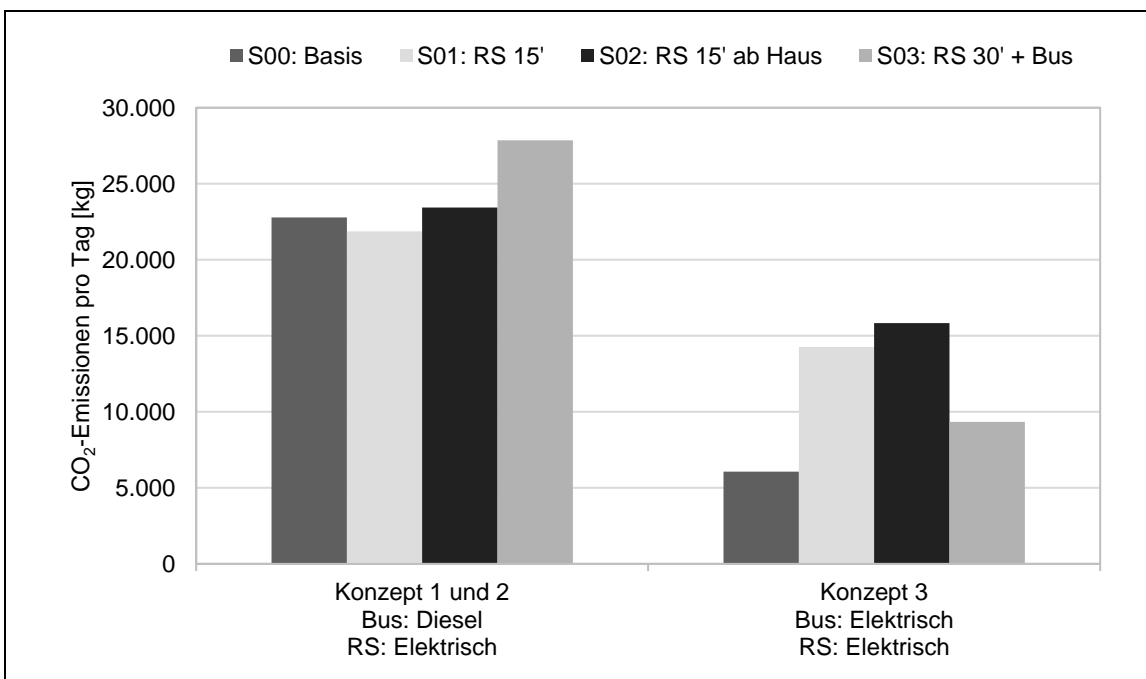


Abbildung 52: CO₂-Emissionen der ÖV-Fahrzeugflotte pro Tag je Fahrzeugkonzept und Szenario (nach RICHTER ET AL. (2021)).

7.5 Ridesharingspezifische Kenngrößen

Tabelle 16 zeigt eine Übersicht über verschiedene ridesharingspezifische Kenngrößen. Es ist zu erkennen, dass der Anteil der Leerfahrtkilometer an den Einsatzkilometern bei zunehmender Ridesharingnachfrage abnimmt und so zwischen 24 Prozent (S03) und 21 Prozent (S02) liegt. Als eine weitere zentrale Kenngröße ist der durchschnittliche Besetzungsgrad dargestellt. Analog zur Abnahme des Leerfahrtanteils steigt der durchschnittliche Besetzungsgrad je Einsatzkilometer bei zunehmender Gesamtnachfrage nach Ridesharing. Insgesamt ist der durchschnittliche Besetzungsgrad einer Lastfahrt jedoch über alle Szenarien hinweg mit etwas unter 2 Personenkilometern je Lastfahrtkilometer in allen Szenarien für die Fahrzeugkapazität von 6 Personen gering. Der durchschnittliche Besetzungsgrad spiegelt sich in den hohen Einsatzkilometern der Ridesharingflotten (vgl. Abbildung 49, S. 135) wieder. Ursache für einen geringen Besetzungsgrad kann in zwei Aspekten gefunden werden. Zum einen ist die Bündelung von Personenwegen räumlich und zeitlich in Hinblick auf maximale Umwegfaktoren und Wartezeiten für Fahrgäste begrenzt. Der Schurwald ist kein städtisch dicht besiedeltes Gebiet, wodurch Fahrtwünsche von Personen von Natur aus weniger gebündelt auftreten. Zum anderen treten nicht alle Fahrtwünsche, die sich eine Fahrzeugfahrt teilen können, von und zu gleicher Quelle und Ziel auf. Dadurch ist auch der durchschnittliche Besetzungsgrad einer zwischenzeitlich voll ausgelasteten Fahrzeugfahrt nicht gleich der Fahrzeugkapazität. Abbildung 53 zeigt die Verteilung der maximalen Besetzungsgrade je Lastfahrt und Szenario. Die durchschnittlichen maximalen Besetzungsgrade je Lastfahrt liegen zwischen 2,42 (S03) und 2,52 (S02). Die durchschnittlichen Umwegfaktoren und die durchschnittliche Umwegzeit je Lastfahrt sind ebenfalls niedrig mit einem maximalen Faktor von 1,19 bzw. 2,7 Minuten in S02. (RICHTER ET AL. (2021))

Szenario	S01 RS 15' mit Haltestellen	S02 RS 15' bis zur Haustür	S03 Bus + RS 30' mit Haltestellen
Anteil Leerfahrt- an Einsatzkilometern	22 %	21 %	24 %
Ø Besetzungsgrad je Einsatzkilometer	1,53	1,56	1,48
Ø Besetzungsgrad je Lastfahrtkilometer	1,96	1,97	1,96
Ø max. Besetzungsgrad je Lastfahrt	2,49	2,52	2,42
Ø Umwegfaktor (Fahrzeit) je Lastfahrt	1,13	1,19	1,10
Ø Umwegzeit je Lastfahrt	1,9 min	2,7 min	1,4 min

Tabelle 16: Anteil Leerfahrtkilometer, Besetzungsgrad und Umwegigkeit im Ridesharing je Szenario (nach RICHTER ET AL. (2021)).

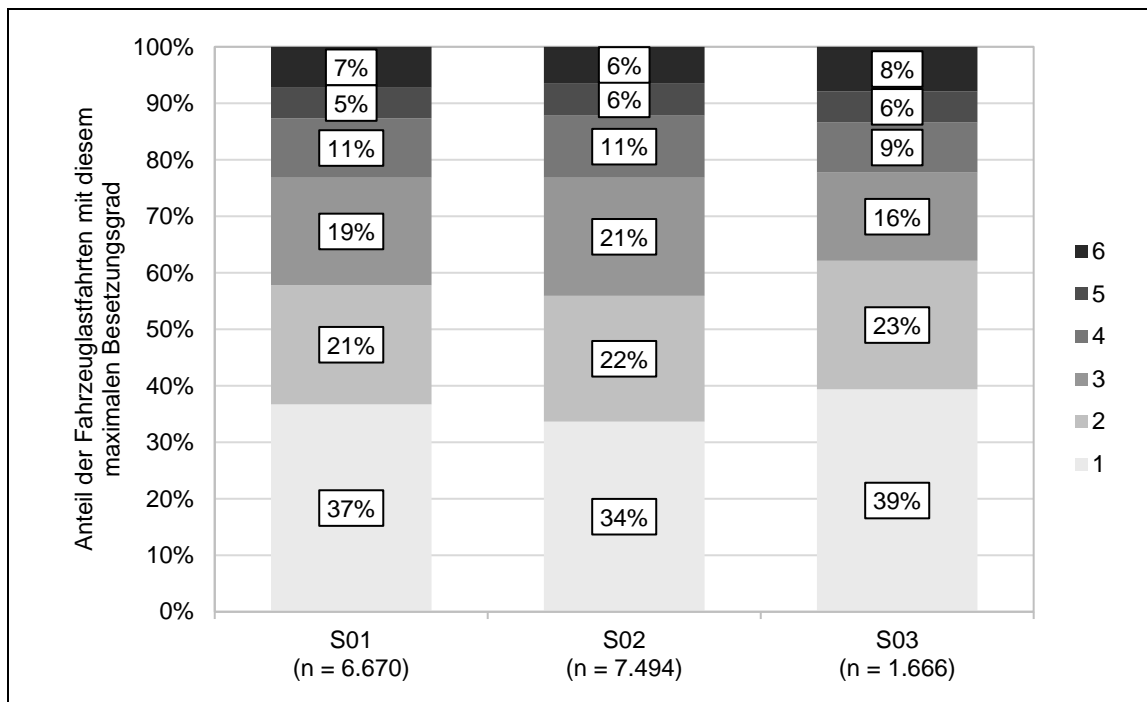


Abbildung 53: Verteilung der maximalen Besetzungsgrade je Lastfahrt und Szenario. Dargestellt ist der Anteil der Ridesharing-Lastfahrten mit 1 bis 6 Fahrgästen als maximalem Besetzungsgrad (n = Lastfahrtanzahl) (RICHTER ET AL. (2021)).

Auf Grundlage der Kostenberechnungen von RICHTER ET AL. (2021) lassen sich darüber hinausgehend die in Tabelle 17 zusammengestellten Kosten für Ridesharing je Personenkilometer und Beförderungsfall ableiten. Dargestellt ist jeweils der Quotient aus durch die Ridesharingflotte generierten Kosten und mittels Ridesharing zurückgelegten Personenkilometern bzw. Ridesharing-Beförderungsfällen. Als Vergleichswerte sind nach gleichem Berechnungsschema die Kosten je im Bus zurückgelegten Personenkilometern und Beförderungsfällen dargestellt. Die Personenkilometer beziehen sich auf die im Straßennetz zurückgelegten Fahrtweiten. Im Ridesharing wird von den Fahrtweiten ohne Umwege zur Mitnahme weiterer Fahrgäste ausgegangen, da diese Fahrtweiten die Grundlage für einen entfernungsabhängigen Tarif bilden könnten.

Das Verhältnis von Kosten je Beförderungsfall und Kosten je Personenkilometer entspricht der durchschnittlichen Fahrtweite je Beförderungsfall. Diese liegt im Ridesharing mit 9,6 (S01 und S02) bzw. 8,6 (S03) Kilometern je Beförderungsfall jeweils deutlich höher als im Busverkehr mit 4,1 (S00), 4,2 (S03) und 2,9 (S01 und S02) Kilometern je Beförderungsfall. Je höher die Reiseweite je Beförderungsfall ist, desto höher liegen die Kosten je Beförderungsfall im Vergleich zu den Kosten je Personenkilometer. Entsprechend liegt der Faktor der Ridesharingkosten je Ridesharing-Beförderungsfall zu den Buskosten je Bus-Beförderungsfall mit dem rund 5- bis 7-fachen deutlich höher als der entsprechende Kostenfaktor in Bezug auf Personenkilometer, der in allen Szenarien zwischen 1,8 und 2,6 liegt.

Der Wechsel von Ridesharingfahrzeugen mit Fahrpersonal auf voll automatisierte Fahrzeuge führt jeweils zu einer Reduktion der Kosten um etwa 20 Cent je Ridesharing-Personenkilometer und etwa 2 Euro je Beförderungsfall. Damit liegen die Kosten bei voll automatisierten Fahrzeugen noch zwischen 42 Cent (S01) und 45 Cent (S03) je Personenkilometer bzw. zwischen 3,90 Euro (S03) und 4,15 Euro (S02) je Beförderungsfall. Verglichen mit anderen in der Literatur verwendeten Kostensätzen (vgl. Kapitel 2.2.3) liegen diese Werte im mittleren bis oberen Bereich. Ein möglicher Grund dafür liegt in dem vergleichsweise geringen Bündelungsgrad. Die in Tabelle 17 dargestellten Kostensätze oder, da diese stark von den von RICHTER ET AL. (2021) getroffenen Annahmen abhängen, die Faktoren von Ridesharingkosten zu Buskosten könnten als erste Anhaltspunkte zur Bildung eines Tarifsystems für Ridesharing im Planungsraum herangezogen werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich bei einem anderen Tarifsystem als dem in den Szenarien angenommenen auch die Nachfrage anpassen wird.

Fahrzeugkonzept		Fahrzeugkonzept 1				Fahrzeugkonzept 3			
		Bus: mit Fahrpersonal, Diesel RS: mit Fahrpersonal, Elektrisch				Bus: Fahrerlos, Elektrisch RS: Fahrerlos, Elektrisch			
Szenario		S00	S01	S02	S03	S00	S01	S02	S03
Kosten in € je Personenkilometer des Fahrzeugtyps	RS	-	0,63	0,66	0,67	-	0,42	0,43	0,45
	Bus	0,28	0,33	0,33	0,27	0,20	0,24	0,24	0,18
<i>Faktor RS/Bus</i>		-	1,9	2,0	2,5	-	1,8	1,8	2,6
Kosten in € je Beförderungsfall des Fahrzeugtyps	RS	-	6,09	6,37	5,79	-	4,00	4,15	3,90
	Bus	1,13	0,95	0,95	1,13	0,81	0,68	0,68	0,75
<i>Faktor RS/Bus</i>		-	6,4	6,7	5,1	-	5,9	6,1	5,2

Tabelle 17: Auf Personenkilometer und Beförderungsfallanzahl je Fahrzeugtyp bezogene Kosten im Ridesharing und Busverkehr je Szenario und Fahrzeugkonzept. Fahrzeugkonzept 2 ergibt sich als Kombination aus Buskosten des Konzepts 1 und Ridesharingkosten des Konzepts 3. Berechnet auf Grundlage der Ergebnisse von RICHTER ET AL. (2021).

Um insbesondere für Ridesharingfahrten, die als Zubringer zu fahrplangebundenen Verkehrsmitteln dienen, einen möglichst verzögerungsarmen Ablauf zu gewährleisten, ist das Vorhalten ausreichender Haltemöglichkeiten an Start- und Zielpunkt der Fahrt Voraussetzung. RICHTER ET AL. (2021) ermitteln für einen der Hauptumsteigepunkte für Ridesharing-Zubringer im Szenario S01 ein Maximum von 12 haltenden Ridesharingfahrzeugen innerhalb eines 15-Minuten-Zeitintervalls. Dieser Wert wird sowohl morgens als auch abends erreicht. Da diese Fahrzeuge jeweils zum Fahrgastwechsel halten, müssen entsprechend viele möglichst zeitgleich verfügbare Haltemöglichkeiten vorgehalten werden. Im Modell ist keine Umverteilung leer wartender Fahrzeuge implementiert. So kommt es im gleichen Szenario zu bis zu 39 Fahrzeugen, die am Umsteigepunkt auf ihren nächsten Einsatz warten. Diese Fahrzeuge könnten auch auf nahegelegene Parkplätze umverteilt werden. Abbildung 54 zeigt die Ganglinien der zum Fahrgastwechsel

haltenden und leer wartenden Fahrzeuge am Beispielumsteigepunkt. (RICHTER ET AL. (2021))

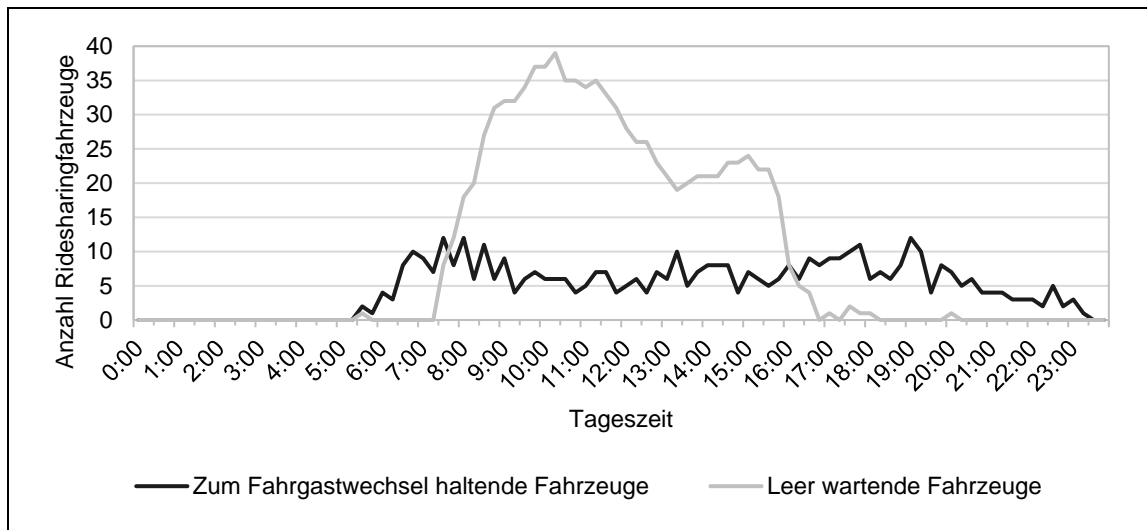


Abbildung 54: Anzahl der Ridesharingfahrzeug-Ankünfte sowie leer wartender Ridesharingfahrzeuge am Umsteigepunkt Bahnhof Esslingen in Szenario S01 je Zeitintervall (RICHTER ET AL. (2021)).

7.6 Zwischenfazit und Bewertung

Inhaltlich lassen sich anhand der von RICHTER ET AL. (2021) durchgeführten Studie wesentliche Erkenntnisse in Bezug auf in den ÖV integrierte Ridesharingangebote ableiten. Durch Ridesharing wird das ÖV-Angebot verbessert. Es werden neue direkte Verbindungen geschaffen, die Bedienungshäufigkeit wird erhöht und die Zu- und Abgangszeiten werden reduziert. In Bezug auf Ridesharing als Zubringer ist vor allem die Erhöhung der Bedienungshäufigkeit ausschlaggebend für eine Verbesserung der Angebotsqualität. Sowohl Ziel- als auch Moduswahl werden von den Änderungen beeinflusst. Der Modal-Split-Anteil des ÖV erhöht sich ebenso wie die mittlere Reiseweite über alle Modi. Ziele im Planungsraum werden attraktiver und es kommt so zu Veränderungen in der Zielwahl. (RICHTER ET AL. (2021))

Nichtsdestotrotz wird die Gesamtfahrleistung durch Ridesharing nicht reduziert. Obwohl es Verlagerungen vom Pkw zum ÖV gibt, können die so eingesparten Fahrzeugkilometer die Mehrkilometer durch Ridesharingfahrzeuge nicht kompensieren. Insgesamt kommt es in den Szenarien mit nahezu keinem Busverkehr im Planungsraum (S01 und S02) zur Erhöhung der Gesamtfahrleistung. Lediglich im kombinierten Szenario S03 kann die Gesamtfahrleistung im Quell-, Ziel- und Binnenverkehr des Planungsraums um 0,7 Prozent reduziert werden. Erklärt wird die hohe durch Ridesharingfahrzeuge erzeugte Fahrleistung durch den mit knapp 2,0 Fahrgästen je Ridesharing-Lastfahrkilometer sehr gering ausfallenden Besetzungsgrad der Fahrzeuge. (RICHTER ET AL. (2021))

Im betrieblichen Aufwand, der mit der Erbringung des Ridesharingangebots einher geht, spiegelt sich der niedrige Besetzungsgrad ebenfalls wieder. Die im Vergleich zum Basisfall stark steigenden Einsatzkilometer und -zeiten im ÖV (Ridesharing und Busse) sowie die hohe Anzahl benötigter Fahrzeuge haben Auswirkungen auf die Kosten, den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen. Auch wenn von voll automatisierten, fahrerlos fahrenden Fahrzeugen ausgegangen wird, sind weiterhin einsatzzeitabhängige Kosten z.B. für die Überwachung der Fahrzeuge zu berücksichtigen. Ähnliches trifft in Bezug auf Energieverbrauch und CO₂-Emissionen zu. Auch wenn elektrisch betriebene Fahrzeuge einen geringeren Energieverbrauch haben und weniger CO₂ emittieren, verbrauchen sie noch immer Energie und sind beim aktuellen Strommix auch nicht emissionsfrei. In Kombination mit dem weiterhin oder zusätzlich durch Busse erbrachten Teil des Angebots führen die untersuchten Szenarien im Vergleich zum Basisfall aufgrund der steigenden Einsatzkilometer und -zeiten größtenteils zur Erhöhung von Kosten, Energieaufwand oder CO₂-Emissionen und zu keiner bemerkenswerten Verringerung. (RICHTER ET AL. (2021))

Zusammenfassend zeigt sich, dass insbesondere direktes Ridesharing attraktiv ist und zu modalen Verlagerungen führt. Dies birgt jedoch auch betrieblichen Mehraufwand und hohe Fahrleistungen. Um einen Mittelweg aus betrieblichem Aufwand und Attraktivitätssteigerung des ÖV zu finden, sind Kompromisslösungen nötig, die die durch Ridesharing implementierte Individualisierung des ÖV begrenzen. Die häufig genannte Vorstellung, dass Ridesharing den ÖV auf der „letzten Meile“ in ländlichen und peri-urbanen Gebieten attraktiver machen kann, kann nur bedingt durch die Ergebnisse gestützt werden. Für Ridesharing als Zubringer müssen beim Umstieg zu fahrplangebundenen Verkehrsmitteln Pufferzeiten eingeplant werden, die die Attraktivität dieser Verbindungen hemmen. Darüber hinaus wird auch bei einem sehr guten ÖV-Angebot der Modal-Split-Anteil von Städten nicht erreicht, da die Pkw-Nutzung im peri-urbanen Raum mit kaum Verlustzeiten verbunden ist. (RICHTER ET AL. (2021))

Die Methodik betreffend wird von RICHTER ET AL. (2021) die praktische Umsetzbarkeit der in dieser Arbeit erläuterten Modellierungsmethode zur Integration von Ridesharingangeboten in ein makroskopisches Verkehrsnachfragemodell auf regionaler Ebene demonstriert. Methodische Vereinfachungen werden vornehmlich in drei Bereichen getroffen.

Erstens werden Ridesharingfahrzeuge nicht bei der auslastungsabhängigen Fahrtzeitberechnung des Modus Pkw berücksichtigt. Die Fahrtzeiten von Pkw- und Ridesharingfahrten werden somit in der Moduswahl unterschätzt. Der Ridesharing-Umwegfaktor wird zudem konstant mit 1,3 angenommen. Der mittlere Ridesharing-Umwegfaktor liegt in allen Szenarien mit 1,10 bis 1,19 niedriger als 1,3. Bei Aufheben dieser Vereinfachung ist folglich mit einer Attraktivitätssteigerung von Ridesharing zu rechnen, die jedoch wieder zu höheren Fahrtzeiten führen würde, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wird.

Zweitens werden die Nutzenparameter der Nutzenfunktionen in Moduswahl und ÖV-Umlegung nicht angepasst, sodass davon ausgegangen wird, dass sich die Wahrnehmung der ÖV-bezogenen Attribute wie z.B. Fahrtzeit im Fahrzeug bei Einführung von

Ridesharing nicht ändert. Die Auswirkungen dieser Annahme sind an dieser Stelle nicht abschätzbar und es benötigt aufwändige Befragungen, um die Neuschätzung der Parameter zu ermöglichen.

Drittens wird die Ridesharingnachfrage auf ganze Zahlen gerundet. Kapitel 4.4 und 4.5, insbesondere Abbildung 24, S. 89 zeigen den Einfluss dieses Vorgehens auf die Einsatzkilometer. Je nach Bündelungsgrenze ist die Ridesharing-Fahrleistung im gerundeten Rechenbeispiel höher oder etwas niedriger als in den nicht gerundeten. Da es jedoch nicht möglich ist, das Berechnungsergebnis anhand realer Werte zu kalibrieren und zu validieren, ist es ebenso nicht möglich abseits theoretischer Überlegungen festzustellen, welche der Berechnungsformen die Realität besser abbildet. Auch ein Vergleich mit anderen Modellergebnissen der Literatur ist nur begrenzt aussagekräftig, da zum einen jedes Gebiet durch seine Siedlungs- und Streckennetzstruktur verschieden ist und zum anderen die Unterschiede in den Berechnungsmethoden groß und deren Einfluss auf das Ergebnis schwierig abzuschätzen ist.

Auch mit diesen Vereinfachungen bildet die Fallstudie jedoch eine gute Grundlage für planerische Entscheidungen. Ridesharing, insbesondere direktes Ridesharing, ist attraktiv und führt zu modalen Verlagerungen. Es muss jedoch bei entsprechender Nachfragestruktur auch mit erhöhten Fahrleistungen gerechnet werden. Zudem zeigt sich, dass insbesondere Ridesharing-Zubringer-Angeboten bei der Planung ein hohes Maß an Aufmerksamkeit zugebracht werden muss. Zum einen bieten sich hier große Möglichkeiten zur Steuerung des Angebots durch wohlüberlegte Festlegung der Anschlusshaltstellen. Zum anderen sind sie im Vergleich zu direkten Angeboten grundsätzlich weniger attraktiv und die Rahmenbedingungen des Umstiegs, die auch die Verfügbarkeit ausreichender Haltemöglichkeiten für Ridesharingfahrzeuge und Pufferzeiten zum Ausgleich von Fahrzeitschwankungen umfassen, spielen eine zentrale Rolle.

8 Fazit und Ausblick

Diese Arbeit präsentiert eine Methodik, die die Integration geteilter Fahrzeugflotten, d.h. die Integration von Sharingangeboten, in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle ermöglicht. Es wird der gesamte Berechnungsablauf eines typischen makroskopischen Verkehrsnachfragemodells, inklusive Rückkopplung zwischen Angebot und Nachfrage, in Bezug auf Carsharing- und Ridesharingangebote hin betrachtet. Es handelt sich daher um eine vollständig in den Berechnungsablauf integrierte Methodik. Die Anwendung im makroskopischen Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart stellt die praktische Umsetzbarkeit unter Beweis und ermöglicht zudem einen tieferen Einblick in für die Planungspraxis relevante Effekte der Angebotsgestaltung eines Ridesharingangebots.

Methodik zur Integration geteilter Fahrzeugflotten

Wie die Literaturobwertung zur Abbildung von Sharingangeboten in Verkehrsnachfragemodellen zeigt, betrachtet der vorgestellte Ansatz eine bisher weitgehend offene Fragestellung zum Thema, da mikroskopische Ansätze nicht ohne Weiteres auf eine makroskopische Modellstruktur übertragen werden können. Es werden Ansätze aufgezeigt, wie unterschiedliche Ausprägungen der Sharingangebote (als Teil des ÖV oder in Konkurrenz dazu stehend, direkte Fahrtangebote oder Zubringerangebote) in ein bestehendes Modell integriert werden können. Die Gliederung der Methodik orientiert sich am Vier-Stufen-Algorithmus inklusive Rückkopplung zwischen Angebot und Nachfrage.

Um die nachfrageabhängigen betrieblichen Entscheidungen zu modellieren, werden diese als zusätzliche Modellstufen integriert. Dabei wird in Fahrtenbündelung und Umlaufbildung unterschieden. Die Fahrtenbündelung bündelt voneinander unabhängige Personenfahrtwünsche zu Fahrzeuglastfahrten und entfällt entsprechend bei Carsharingangeboten. Im Schritt der Umlaufbildung werden Fahrzeuglastfahrten unter Zuhilfenahme von Leerfahrten zu Umläufen verkettet. Für beide Schritte wird eine praktikable Lösung präsentiert, die sowohl für ganzzahlige als auch nicht-ganzzahlige Nachfrage verwendet werden kann. Im Schritt der Umlaufbildung sollte vor allem geprüft werden, inwiefern die benötigten Leerfahrten und die Fahrzeuganzahl durch die Verwendung nicht-ganzzahliger Nachfragewerte beeinflusst werden. Darüber hinaus weist der Schritt der Fahrtenbündelung Forschungsbedarf auf. Folgende Aspekte wurden in dieser Arbeit in einem ersten Ansatz betrachtet, weitere ausführlichere Untersuchungen sollten durchgeführt werden, um die Ergebnisse zu stützen bzw. zu spezifizieren:

- Einfluss der Funktionsform zur Berechnung der benötigten Fahrzeugfahrtanzahl bei makroskopischer Nachfrage:

Die zugrundeliegende Rampenfunktion führt im Vergleich zu ganzzahligen Beispielrechnungen tendenziell zu einer überschätzten Fahrzeuglastfahrtanzahl bei geringer Nachfrage von weniger als einem Personenweg je Zeitintervall. Insgesamt gleichen sich bei zunehmender Nachfrage Bereiche der Unter- und Überschätzung aus.

- Ansatz einer alternativen Funktionsform zur Fahrzeuglastfahrberechnung:
Eine aus der ganzzahligen Beispielrechnung abgeleitete stetige Funktion zu Erwartungswerten der Fahrzeuglastfahrtanzahl in Abhängigkeit der mittleren Nachfrage, die einer makroskopischen Nachfrageinterpretation entspricht.
- Einfluss der räumlichen Verteilung der Nachfrage auf den Bündelungsgrad:
Die räumliche Verteilung der Nachfrage hat einen hohen Einfluss auf das Bündelungsergebnis. Der Effekt wird durch die gewählte Berechnungsfunktion zur benötigten Fahrzeugfahrtanzahl verstärkt und verzerrt.
- Runden und Bündelungsgrenze als Hilfsmittel zur Berechnung:
In makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen mit einer feinen zeitlichen und räumlichen Granularität sind sehr geringe Nachfragewerte je Verkehrszelle und Zeitintervall zu erwarten. Um den durch die hohe Anzahl nachgefragter Relationen im Bündelungsschritt entstehenden Rechenaufwand zu begrenzen, können Nachfragewerte gerundet oder eine Bündelungsgrenze eingeführt werden. Die Bündelungsgrenze sollte nach vorhergehender Nachfrageanalyse gewählt werden, um die Effekte auf das Ergebnis besser abschätzen zu können. Der vorgestellte Rundungsalgorithmus gibt die Nachfragestruktur gut wieder, dennoch gehen Informationen und die Eindeutigkeit einer makroskopischen Berechnungsweise verloren.
- Einfluss der festgelegten Zeitintervalldauer:
Im Bündelungsschritt legt die Zeitintervalldauer die maximale Wartezeit der Fahrgäste fest. Im Umlaufbildungsschritt gibt sie die kleinste Einheit der Fahrzeugfahrzeiten wieder, entsprechend darf sie nicht zu hoch gewählt werden, um Überschätzungen und damit eine unverhältnismäßig hohe Anzahl benötigter Fahrzeuge zu vermeiden. Es wird vorgeschlagen, die zeitliche Auflösung der Nachfrage in mindestens 15-Minuten-Zeitintervalle zu gliedern und eine möglichst feine Aufrasterung der Verkehrszellen zu wählen, um insbesondere den Bündelungsprozess bei Ridesharing gut abbilden zu können.
- Einfluss der maximalen Fahrgastwartezeit auf den Besetzungsgrad:
In Kombination mit der Gesamtnachfrage lassen sich Erwartungswerte des durchschnittlichen Besetzungsgrads unter Annahme verschiedener Servicequalitäten im Sinne der maximalen Wartezeit berechnen. Dies ist hilfreich für Abschätzungen der Rentabilität aus Betreibersicht und der Zielerreichung aus Sicht der Verkehrsplanung.

Die Erweiterung der Moduswahl ist insbesondere dann von zentraler Bedeutung, wenn Sharingangebote in Konkurrenz zu anderen bisher im Modell abgebildeten Modi stehen. Es sollte möglichst ein Moduswahlmodell gewählt werden, das gegebenenfalls auftretende Abhängigkeiten zwischen nicht beobachteten Eigenschaften der Alternativen abbilden kann (beispielsweise ein Nested Logit oder Cross Nested Logit Modell). Ebenso müssen die Parameterwerte der Nutzenfunktionen neu ermittelt werden. Dies ist kaum anders lösbar als mittels aufwändiger Erhebungen. Die beispielhaft durchgeführte Erhebung zeigt einen Weg auf.

Werden Sharingangebote als Teil des ÖV angeboten, ist die Integration dieser Angebote in die Verkehrsmittelwahl und Verbindungswahl der Umlegung nötig. Es wird ein Ansatz vorgestellt, der auf der räumlichen Trennung der drei Angebotstypen direktes Sharing, Sharing als Zubringer und ausschließlich fahrplangebundenem ÖV beruht. Eine zeitliche Differenzierung ist prinzipiell mit dem gleichen Ansatz möglich, jedoch weisen wenige makroskopische Verkehrsnachfragemodelle die Voraussetzung auf, tageszeitlich differenzierte Kenngrößenmatrizen in der Moduswahl zu verarbeiten.

Im Rahmen der Arbeit liegt der Schwerpunkt auf Ridesharingangeboten, jedoch ist die Methodik analog, in vereinfachter Form ohne Bündelungsschritt, für Carsharingangebote anwendbar.

Planerische Erkenntnisse in Bezug auf Ridesharing

Aus den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen, insbesondere der Untersuchung des Einflusses der maximalen Wartezeit, der Beispielerhebung und der Fallstudie, lassen sich Erkenntnisse in Bezug auf die Ausgestaltung von Ridesharingangeboten ableiten.

- Die vom Betreiber garantierte maximale Wartezeit auf ein Ridesharingfahrzeug ist eine zentrale Stellschraube der Angebotsqualität. Unter Annahme einer Gleichverteilung der Fahrgastfahrtwünsche im Betrachtungszeitraum ergibt sich beispielsweise bei einer maximalen Wartezeit von 10 Minuten und einer Fahrzeugkapazität von 6 Fahrgästen, dass mindestens 5 Fahrtwünsche je Stunde vorliegen müssen, um einen mittleren Besetzungsgrad von 1,3 Fahrgästen zu erzielen. Damit läge der Besetzungsgrad bei dem Durchschnitt jetziger Pkw-Fahrten.
- Die Erhebungsergebnisse deuten darauf hin, dass unter den fahrradaffinen Umfrageteilnehmenden direktes Ridesharing vor allem den privaten Pkw oder den ÖV ersetzt. Die Fahrtzeit im Ridesharingfahrzeug wird etwas negativer wahrgenommen als in Pkw und ÖV. Die Automatisierung (vollautomatisiert oder mit Fahrpersonal) der Ridesharingfahrzeuge hat in dieser Umfrage keinen signifikanten Einfluss auf die Wahlentscheidungen der Teilnehmenden.
- Wird Ridesharing in den ÖV integriert, kann die Angebotsqualität des ÖV insbesondere in Bezug auf Bedienungshäufigkeit, Umsteigehäufigkeiten und Zu- und Abgangszeiten verbessert werden. Es sollte jedoch eine direkte Konkurrenz von fahrplangebundenem Verkehr zu Ridesharing vermieden werden, um die Bündelungswirkung der bestehenden fahrplangebundenen Angebote nicht zu schwächen.
- Insbesondere direktes Ridesharing ist attraktiv und führt zu modalen Verlagerungen, führt jedoch bei entsprechender Nachfragestruktur ebenso zu hohen Fahrleistungen. Wird Ridesharing als Zubringer eingesetzt, ist die Attraktivitätssteigerung begrenzt, da stets mindestens ein Umstieg sowie zugehörige Pufferzeiten benötigt werden. Ob Ridesharing als Zubringer den ÖV attraktiver machen kann, ist somit sehr von der Qualität des zu vergleichenden Bus-Zubringers abhängig. Es bieten sich jedoch

bessere Lenkungs- und Bündelungsmöglichkeiten der Nachfrage als bei direkten Ridesharingangeboten. Mittels festgelegter Umstiegspunkte von Ridesharingfahrzeugen zu fahrplangebundenen Verkehrsmitteln können Fahrtwünsche besser gebündelt werden und beispielsweise entsprechende Haltemöglichkeiten vorgesehen werden, um einen reibungslosen Übergang zu ermöglichen.

- Die Gesamtfahrleistung wird durch die Einführung von Ridesharing nicht zwangsläufig reduziert. Im Gegenteil führen Leerfahrkilometer, Änderungen in der Zielwahl sowie die generelle Individualisierung des öffentlichen Verkehrs, wenn Ridesharing beispielsweise Linienbusse ersetzt, tendenziell zu einer höheren Fahrleistung, wenn kein hoher Besetzungsgrad der Fahrzeuge erreicht wird. Das spiegelt sich auch im betrieblichen Aufwand sowie Energieverbrauch und CO₂-Emissionen wider. Ein niedriger Besetzungsgrad ist Folge einer zeitlich und räumlich stark verteilten Nachfrage, was in peri-urbanen und ländlichen Räumen eine häufig auftretende Rahmenbedingung darstellt.
- Unter Einsatz vollautomatisiert und elektrisch betriebener Ridesharingfahrzeuge können die Kosten im Vergleich zu konventionell betriebenen Fahrzeugen je Personenkilometer und Beförderungsfall um ein Vielfaches reduziert werden. Dennoch muss berücksichtigt werden, dass auch diese Fahrzeuge nicht vollständig emissionsfrei sind, Energie verbrauchen und einsatzzeitabhängige Kosten anfallen.
- Ersetzt Ridesharing konventionelle Linienbusse des ÖV, werden vergleichsweise viele Ridesharingfahrzeuge benötigt. Diese Zahl ist jedoch auch im Verhältnis dazu zu beurteilen, wie viele private Pkw benötigt würden, um die gleiche Beförderungsleistung zu erbringen. Sharingangebote sind somit bei entsprechender Akzeptanz unter Nutzenden privater Pkw gut dazu geeignet, die benötigte Fahrzeuggesamtanzahl unter Berücksichtigung privater Pkw zu reduzieren. Dabei gilt, dass ein attraktives Ridesharingangebot mit geringen Wartezeiten und kurzen Zugangswegen tendenziell zu einer guten Akzeptanz führt. Das wiederum hat eine hohe Anzahl benötigter Ridesharingfahrzeuge und potenziell wenig private Pkw zur Folge. Im Umkehrschluss hat ein weniger attraktives Ridesharingangebot auch weniger benötigte Ridesharingfahrzeuge aber auch mehr benötigte private Pkw zur Folge.

Es lässt sich erkennen, dass Ridesharing besonders dann effizient ist, wenn eine hohe Nachfrage besteht. Diese auch räumlich zentriert hohe Nachfrage ist vor allem in (Groß-)Städten zu finden. In diesen Städten wiederum ist jedoch überwiegend die Nutzung des zumeist gut ausgebauten traditionellen ÖV gewünscht, da dieser eine noch höhere Bündelungswirkung als Ridesharing aufweist. Im ländlichen Raum hingegen, wo eine Verbesserung der Daseinsvorsorge durch Ridesharing erzielt werden könnte, ist die Nachfrage meist zu gering oder verstreut um einen hohen Besetzungsgrad der Fahrzeuge zu erzielen. Zudem sind Pkw-Fahrten in ländlichen Räumen oftmals mit nur geringen Verlustzeiten verbunden, sodass es wenig Anreize gibt vom Pkw zu wechseln. Dennoch können das ÖV-Angebot verbessert und auch neue Fahrgäste gewonnen werden. Das ist wiederum auch mit erhöhten betrieblichen Aufwänden verbunden. Es ist Aufgabe der Verkehrsplanung und -politik diesen Gegebenheiten Rechnung zu tragen

und in Entscheidungen zu möglichen Restriktionen und Begrenzungen zu berücksichtigen.

Bewertung und Ausblick

Die vorgestellte Methodik zur Integration von Sharingangeboten in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle ist eine praktikable Lösung zur Untersuchung potenziell bedeutender Angebotsformen. Der Ansatz lässt sich ganzheitlich in die Verkehrsnachfrageberechnung einbeziehen. Dadurch wird auch die Wechselbeziehung zwischen nachfrageabhängigem Angebot und angebotsabhängiger Nachfrage berücksichtigt. Dieser Aspekt ist von zentraler Bedeutung für Aussagen zu Wirkungen (vollautomatisierter) Sharingangebote und sollte in Untersuchungen zu diesem Thema generell berücksichtigt werden. Es wird zudem gezeigt, dass auch makroskopische Verkehrsnachfragemodelle geeignet sind, die langfristige, strategische Planung von Sharingangeboten zu unterstützen. Dennoch ist festzuhalten, dass insbesondere der Schritt der Fahrtenbündelung weniger intuitiv als in mikroskopischen Modellen gelöst werden kann und es noch weiterer Untersuchungen zu dem Thema bedarf. Zudem wird der Aspekt der Mobilitätswerkzeugwahl nicht behandelt. Entsprechend erster empirischer Untersuchungen zu dem Thema sowie Erkenntnissen aus der Forschung in Bezug auf aktuelle Carsharingangebote ist jedoch zu erwarten, dass eine weite Verbreitung von Sharingangeboten auch Einfluss auf beispielsweise die Pkw-Verfügbarkeit hat. Folglich sollten Modelle um eine entsprechende Modellstufe erweitert werden.

Ein zentrales Problem, das die makroskopische Modellierung gleichermaßen wie mikroskopische Ansätze betrifft, ist die derzeit fehlende Vergleichbarkeit der berechneten Ergebnisse mit realen Werten. Das liegt darin begründet, dass eine Angebotsausprägung untersucht wird, die so noch nicht in der Realität beobachtet werden kann. Eine Kalibrierung und Validierung des Modells kann somit stets nur auf Grundlage der Erwartungen und des Plausibilitätsempfindens der Modellerstellenden erfolgen. Um den dadurch erzeugten Fehler zu minimieren und transparent zu gestalten, sollten die zugrundeliegenden Modellannahmen stets eingehend analysiert und sichtbar gemacht werden. Stated Preference Befragungen, wie die beispielhafte Erhebung im Rahmen dieser Arbeit, spielen eine zentrale Rolle dabei, Modelle auf möglichst guten Datengrundlagen statt Annahmen aufzubauen und sollten daher ausgebaut werden. Für zukünftige Arbeiten auch außerhalb der Modellierung von Sharingangeboten sind Untersuchungen zur Vergleichbarkeit von mikroskopischen und makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen von hohem Wert. So könnten Modellergebnisse insgesamt besser miteinander verglichen werden und unter Umständen einen Teil der fehlenden real erhobenen Vergleichswerte ausgleichen.

Als zusätzlicher Wert der Modellierung eines neuen Sharingangebots ist festzuhalten, dass die Angebotsplanung während des Modellierungsprozesses detailliert durchdacht werden muss und Fragestellungen aufgezeigt werden, die anders hätten übersehen werden können. Vor allem vor dem Hintergrund automatisierter Fahrzeuge und den vielen

mit ihnen verbundenen Hoffnungen ist es von zentraler Bedeutung, frühzeitig und möglichst objektiv und fundiert die nötigen Restriktionen und Wirkungsmechanismen zu identifizieren, um die Entwicklung entsprechend den Zielen der Verkehrsplanung auch unter Umweltaspekten zu lenken. Verkehrsnachfragemodelle sind dafür ein geeignetes Mittel und ein großer Teil der bestehenden Verkehrsnachfragemodelle ist makroskopisch. Insbesondere da Verkehrsnachfragemodelle gebietsspezifisch angelegt sind, sollte es möglich sein, die Fragestellungen bezüglich weitverbreiteter Sharingangebote in möglichst vielen von ihnen zu untersuchen. Die vorliegende Arbeit bereitet durch die Vorstellung einer Methodik für makroskopische Verkehrsnachfragemodelle einen Weg in diese Richtung.

Literaturverzeichnis

- AZEVEDO, C.L., MARCZUK, K., RAVEAU, S., SOH, H., ADNAN, M., ET AL. (2016): *Microsimulation of Demand and Supply of Autonomous Mobility On-Demand*. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2564 (1). S. 21-30. Verfügbar unter: doi:10.3141/2564-03
- BATES, J. (2008): *History of Demand Modelling*. In: Handbook of transport modelling. D.A. Hensher und K.J. Button (Hg.). 2. ed. Amsterdam: Elsevier, S. 11-34. ISBN 9780080453767.
- BECKER, H., BECKER, F., ABE, R., BEKHOR, S., BELGIAWAN, P.F., ET AL. (2020): *Impact of vehicle automation and electric propulsion on production costs for mobility services worldwide*. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice, 138. S. 105-126. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tra.2020.04.021
- BEN-AKIVA, M., BIERLAIRE, M. (1999): *Discrete Choice Methods and their Applications to Short Term Travel Decisions*. In: Handbook of Transportation Science. R.W. Hall (Hg.). Boston, MA: Springer, S. 5-33. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-1-4615-5203-1. ISBN 978-1-4615-5203-1.
- BEN-AKIVA, M., BIERLAIRE, M. (2003): *Discrete Choice Models with Applications to Departure Time and Route Choice*. In: Handbook of Transportation Science. 56. R.W. Hall (Hg.). 2nd ed. Secaucus: Kluwer Academic Publishers, S. 7-37. Verfügbar unter: doi:10.1007/b101877. ISBN 1-4020-7246-5.
- BEN-AKIVA, M., LERMAN, S.R. (2006): *Discrete choice analysis - Theory and application to travel demand*. Cambridge, Mass.: MIT Press. In: MIT Press series in transportation studies. 9. ISBN 0262022176.
- BISCHOFF, J., MACIEJEWSKI, M., NAGEL, K. (2017): *City-wide shared taxis: A simulation study in Berlin*. In: IEEE ITSC 2017. 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Piscataway, NJ: IEEE, S. 275-280. ISBN 978-1-5386-1526-3.
- BMVI (2021): *Perspektiven für den Stadtverkehr der Zukunft - Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur*. BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (Hg.). Zugriff am: 7. März 2022. Verfügbar unter: www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/perspektiven-stadtverkehr-zukunft.html
- BOESCH, P.M., CIARI, F., AXHAUSEN, K.W. (2016): *Autonomous Vehicle Fleet Sizes Required to Serve Different Levels of Demand*. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2542 (1). S. 111-119. Verfügbar unter: doi:10.3141/2542-13
- BÖSCH, P.M., BECKER, F., BECKER, H., AXHAUSEN, K.W. (2018): *Cost-based analysis of autonomous mobility services*. In: Transport Policy, 64. S. 76-91. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tranpol.2017.09.005

- CZARNETZKI, F., SIEK, F. (2021): *Dezentrale Mobilitätsstationen in urbanen Wohnquartieren - Auswirkungen auf den PKW-Besitz von Carsharing-Nutzenden*. In: Internationales Verkehrswesen, 73 (1). Verfügbar unter: doi:10.15480/882.3569
- CZIOSKA, P., MATTFELD, D.C., SESTER, M. (2017): *GIS-based identification and assessment of suitable meeting point locations for ride-sharing*. In: Transportation Research Procedia, 22. S. 314-324. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.trpro.2017.03.038
- DALY, A.J., ZACHARY, S. (1978): *Improved multiple choice models*. In: Determinants of travel choice. D.A. Hensher und Q. Dalvi (Hg.). Farnborough: Saxon House. ISBN 0566001845.
- DER BUNDESWAHLLLEITER (2015): *Hare/Niemeyer*. DER BUNDESWAHLLLEITER (Hg.). Statistisches Bundesamt. Wiesbaden. Zugriff am: 17. Dezember 2021. Verfügbar unter: www.bundeswahlleiter.de/service/glossar/h/hare-niemeyer.html
- 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
- FAGNANT, D.J., KOCKELMAN, K.M. (2018): *Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas*. In: Transportation, 45 (1). S. 143-158. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11116-016-9729-z
- FGSV (2021): *Hinweise für Kenngrößen zur Beschreibung und Bewertung von Ridepooling-Systemen (H KRipoo)*. Köln: FGSV-Verl. ISBN 978-3-86646-303-7.
- FGSV (2022): *Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen für den Personenverkehr (EVNM-PV)*. Köln: FGSV-Verl.
- FLÖTTERÖD, G. (2016): *MATSim as a Monte-Carlo Engine*. In: The Multi-Agent Transport Simulation MATSim. A. Horni, K. Nagel und K.W. Axhausen (Hg.). London: Ubiquity Press, S. 327-336. Verfügbar unter: doi:10.5334/baw. ISBN 9781909188754.
- FLÖTTERÖD, G., KICKHÖFER, B. (2016): *Choice Models in MATSim*. In: The Multi-Agent Transport Simulation MATSim. A. Horni, K. Nagel und K.W. Axhausen (Hg.). London: Ubiquity Press, S. 337-346. Verfügbar unter: doi:10.5334/baw. ISBN 9781909188754.
- FOLJANTY, L. (2020): *On-Demand Ridepooling Market: 2020 Recap*. Zugriff am: 3. April 2022. Verfügbar unter: lukas-foljanty.medium.com/on-demand-ridepooling-market-2020-recap-71a229f2e7b9
- FRIEDRICH, M., HARTL, M., MAGG, C. (2018): *A modeling approach for matching ridesharing trips within macroscopic travel demand models*. In: Transportation, 45 (6). S. 1639-1653. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11116-018-9957-5

- GKARTZONIKAS, C., GKRTIZA, 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
- GUNAWAN, R.K., SUSILAWATI (2021): *A Study of Spatiotemporal Distribution of Mobility-On-Demand in Generating Pick-Up/Drop-Offs Location Placement*. In: Smart Cities, 4 (2). S. 746-766. Verfügbar unter: doi:10.3390/smartcities4020038
- HARTL, M., DUDT, N. (2019): *Optimale Ein- und Ausstiegsorte beim regionalen Ridesharing*. In: Straßenverkehrstechnik, 63 (6). S. 418-423.
- HARTLEB, J., FRIEDRICH, M., RICHTER, E. (2021): *Umlaufbildung für On-Demand Fahrzeugflotten in makroskopischen Nachfragemodellen*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.). In: HEUREKA 2021. Optimierung in Verkehr und Transport. Tagungsbeiträge zur HEUREKA '21 - Online-Konferenz am 13. und 14. April 2021. Köln: FGSV-Verl. ISBN 978-3-86446-322-8. Verfügbar unter: verlag.fgsv-datenbanken.de/media/upload/tagungsbaende/FGSV_002_127/FGSV_002_127-20.pdf
- HENSHER, D.A., ROSE, J.M., GREENE, W.H. (2005): *Applied choice analysis - A primer*. Cambridge: Cambridge Univ. Press. Verfügbar unter: doi:10.1017/CBO9780511610356. ISBN 978-0-521-84426-0.
- HÖRL, S. (2017): *Agent-based simulation of autonomous taxi services with dynamic demand responses*. In: Procedia Computer Science, 109. S. 899-904. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procs.2017.05.418
- HÖRL, S., BECKER, F., DUBERNET, T.J.P., AXHAUSEN, K.W. (2019): *Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge - Eine Abschätzung*. Forschungsprojekt SVI 2016/001 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI). Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) Bundesamt für Strassen (ASTRA). Verfügbar unter: ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/vpl/reports/1401-1500/ab1433.pdf
- HORNI, A., NAGEL, K., AXHAUSEN, K.W. (2016a): *Introducing MATSim*. In: The Multi-Agent Transport Simulation MATSim. A. Horni, K. Nagel und K.W. Axhausen (Hg.). London: Ubiquity Press, S. 3-8. Verfügbar unter: doi:10.5334/baw. ISBN 9781909188754.
- HORNI, A., NAGEL, K., AXHAUSEN, K.W. (Hg.) (2016b): *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*: Ubiquity Press. London. ISBN 9781909188754.
- HYLAND, M.F., MAHMASSANI, H.S. (2017): *Taxonomy of Shared Autonomous Vehicle Fleet Management Problems to Inform Future Transportation Mobility*. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2653 (1). S. 26-34. Verfügbar unter: doi:10.3141/2653-04

- JING, P., HU, H., ZHAN, F., CHEN, Y., SHI, Y. (2020): *Agent-based simulation of autonomous vehicles: A systematic literature review*. In: IEEE Access. Verfügbar unter: doi:10.1109/ACCESS.2020.2990295
- KAGERBAUER, M., KOSTORZ, N., WILKES, G., DANDL, F., ENGELHARDT, R., ET AL. (2021): *Ridepooling in der Modellierung des Gesamtverkehrs - Methodenbericht zur MOIA Begleitforschung*. Verfügbar unter: doi:10.5445/IR/1000141282
- KAGHO, G.O., MELI, J., WALSER, D., BALAC, M. (2022): *Effects of population sampling on agent-based transport simulation of on-demand services*. In: Procedia Computer Science, 201. S. 305-312. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procs.2022.03.041
- KOLAROVA, V. (2021): *Measuring, analysing and explaining the value of travel time savings for autonomous driving*. Dissertation: Humboldt-Universität zu Berlin. Verfügbar unter: doi:10.18452/23077
- KUHNIMHOF, T., EISENMANN, C. (2021): *Mobility-on-demand pricing versus private vehicle TCO: how cost structures hinder the dethroning of the car*. In: Transportation. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11116-021-10258-5
- LAU, S.T., SUSILAWATI, S. (2021): *Shared autonomous vehicles implementation for the first and last-mile services*. In: Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 11. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.trip.2021.100440
- MARCZUK, K.A., HONG, H.S.S., AZEVEDO, C.M.L., ADNAN, M., PENDLETON, S.D., ET AL. (2015): *Autonomous mobility on demand in SimMobility: Case study of the central business district in Singapore*. In: 2015 IEEE 7th International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS 2015) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM 2015). Angkor Wat, Siem Reap, Cambodia, 15 - 17 July 2015. Piscataway, NJ: IEEE, S. 167-172. ISBN 978-1-4673-7337-1.
- MARTIN, E., SHAHEEN, S.A., LIDICKER, J. (2010): *Impact of Carsharing on Household Vehicle Holdings*. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2143 (1). S. 150-158. Verfügbar unter: doi:10.3141/2143-19
- MCNALLY, M.G., RINDT, C.R. (2008): *The Activity-Based Approach*. In: Handbook of transport modelling. D.A. Hensher und K.J. Button (Hg.). 2. ed. Amsterdam: Elsevier, S. 55-73. ISBN 9780080453767.
- MENON, N., BARBOUR, N., ZHANG, Y., PINJARI, A.R., MANNERING, F. (2019): *Shared autonomous vehicles and their potential impacts on household vehicle ownership: An exploratory empirical assessment*. In: International Journal of Sustainable Transportation, 13 (2). S. 111-122. Verfügbar unter: doi:10.1080/15568318.2018.1443178
- 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 Transportation Research Board. Verfügbar unter: trid.trb.org/view/1573116

- 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
- NOBIS, C., KUHNIMHOF, T. (2018): *Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht*. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15). Bonn, Berlin. Zugriff am: 1. April 2022. Verfügbar unter: www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf
- ORTÚZAR, J.D.D., WILLUMSEN, L.G. (2011): *Modelling Transport*. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons. ISBN 9780470760390.
- PERNESTÅL, A., KRISTOFFERSSON, I. (2019): *Effects of driverless vehicles - Comparing simulations to get a broader picture*. In: *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 19 (1). Verfügbar unter: doi:10.18757/EJTIR.2019.19.1.4079
- PESTEL, E. (2021): *Qualität von Verkehrsnachfragemodellen*. Dissertation. Universität Stuttgart: Universität Stuttgart. In: *Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen*. Heft 60 (April 2021). Verfügbar unter: doi:10.18419/opus-11752. ISBN 978-3-9821138-1-4.
- PTV GROUP (2020): *PTV Visum 2020 Online-Hilfe*. Siehe Abschnitt Bedarfsorientierter Verkehr. Zugriff am: 18. November 2021. Verfügbar unter: cgi.ptvgroup.com/vision-help/VISUM_2020_DEU/
- RECK, D.J., AXHAUSEN, K.W. (2020): *Subsidized ridesourcing for the first/last mile: how valuable for whom?* In: *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 20 (4). S. 59-77. Verfügbar unter: doi:10.18757/EJTIR.2020.20.4.5314
- RICHTER, E., FRIEDRICH, M., MIGL, A., HARTLEB, J. (2019): *Integrating ridesharing services with automated vehicles into macroscopic travel demand models*. In: *MT-ITS 2019. 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems*. Piscataway, New Jersey: IEEE. ISBN 978-1-5386-9484-8.
- RICHTER, E., SEELHORST, K., FRIEDRICH, M. (2021): *Studie zur Integration eines autonomen Ridesharingangebots in den ÖV im peri-urbanen Raum der Region Stuttgart*. Im Rahmen des EU-Förderprojekts "Dynaxibility4CE". Auftraggeber: Verband Region Stuttgart. Stuttgart. Zugriff am: 20. März 2022. Verfügbar unter: www.interreg-central.eu/Content.Node/Dynaxibility4CE/RidesharingImSchurwald-Endbericht-VRS-V05.pdf
- RITZ, C. (2019): *Modellierung und Wirkung von Maßnahmen der städtischen Verkehrsplanung*. Dissertation. In: *Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen*. Heft 57 (Mai 2019). Verfügbar unter: doi:10.18419/opus-10780. ISBN 978-3-9816754-7-4.

- ROSE, J.M., BLIEMER, M.C.J. (2009): *Constructing Efficient Stated Choice Experimental Designs*. In: *Transport Reviews*, 29 (5). S. 587-617. Verfügbar unter: doi:10.1080/01441640902827623
- SCHNABEL, W., LOHSE, D., LÄTZSCH, L. (1997): *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. - Bd. 2: Verkehrsplanung. 2.*, neu bearb. Aufl. Berlin: Verl. für Bauwesen. ISBN 3345005670.
- SEELHORST, K. (2020): *Wirkung von integrierten Ridepoolingangeboten*. Masterarbeit. Universität Stuttgart. Institut für Straßen- und Verkehrswesen.
- SOMMER, C., SCHÄFER, F., LÖCKER, G., HATTOP, T., SAIGHANI, A. (2016): *Mobilitäts- und Angebotsstrategien in ländlichen Räumen*. BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (Hg.). Zugriff am: 29. März 2022. Verfügbar unter: www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/mobilitaets-und-angebotsstrategien-in-laendlichen-raeumen-neu.html
- SONNLEITNER, J., FRIEDRICH, M., RICHTER, E. (2022): *Impacts of highly automated vehicles on travel demand: macroscopic modeling methods and some results*. In: *Transportation*, 49 (3). S. 927-950. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11116-021-10199-z
- 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 (1). S. 29-49. Verfügbar unter: doi:10.1080/01441647.2018.1523253
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2011): *Mikrozensusnetz - Bevölkerung im 100 Meter-Gitter*. STATISTISCHES BUNDESAMT (Hg.). Zugriff am: 16. Januar 2022. Verfügbar unter: www.zensus2011.de/DE/Home/Aktuelles/DemografischeGrunddaten.html
- TAJADDINI, A., VU, H.L. (2022): *Modeling the long-term regional impacts of autonomous vehicles: A case study of Victoria, Australia*. In: *Journal of Intelligent Transportation Systems*. S. 1-12. Verfügbar unter: doi:10.1080/15472450.2022.2053528
- TRAIN, K.E. (2009): *Discrete choice methods with simulation*. 2nd ed. Cambridge, New York: Cambridge University Press. ISBN 0521747387.
- TRITSCHLER, S., BIECHELE, M. (2020): *Fortschreibung des VRS-Verkehrsmodells auf den Prognosehorizont 2030*. Im Auftrag des Verbands Region Stuttgart (VRS).
- TROMMER, S., KOLAROVA, V., FRAEDRICH, E., KRÖGER, L., KICKHÖFER, B., ET AL. (2016): *Autonomous Driving - The Impact of Vehicle Automation on Mobility Behaviour*. Projektbericht. Verfügbar unter: elib.dlr.de/110337/
- VOSOOGHI, R. (2019): *Shared autonomous vehicle service design, modeling, and simulation*. Dissertation. Université Paris Saclay. Zugriff am: 2. April 2022. Verfügbar unter: www.theses.fr/2019SACLC071.pdf

- WANG, B., ORDONEZ MEDINA, S.A., FOURIE, P. (2018): *Simulation of Autonomous Transit On Demand for Fleet Size and Deployment Strategy Optimization*. In: *Procedia Computer Science*, 130. S. 797-802. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procs.2018.04.138
- WEN, J., CHEN, Y.X., NASSIR, N., ZHAO, J. (2018): *Transit-oriented autonomous vehicle operation with integrated demand-supply interaction*. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 97. S. 216-234. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.trc.2018.10.018
- WILKES, G., BRIEM, L., HEILIG, M., HILGERT, T., KAGERBAUER, M., ET AL. (2021): *Determining service provider and transport system related effects of ridesourcing services by simulation within the travel demand model mobiTopp*. In: *European Transport Research Review*, 13 (1). Verfügbar unter: doi:10.1186/s12544-021-00493-3
- WILLIAMS, H.C.W.L. (1977): *On the Formation of Travel Demand Models and Economic Evaluation Measures of User Benefit*. In: *Environment and Planning A: Economy and Space*, 9 (3). S. 285-344. Verfügbar unter: doi:10.1068/a090285
- YIN, B., LIU, L., COULOMBEL, N., VIGUIÉ, V. (2017): *Evaluation of ridesharing impacts using an integrated transport land-use model: a case study for the Paris region*. In: *Transportation Research Procedia*, 27. S. 824-831. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.trpro.2017.12.083
- ZHAO, Y., KOCKELMAN, K.M. (2018): *Anticipating the Regional Impacts of Connected and Automated Vehicle Travel in Austin, Texas*. In: *Journal of Urban Planning and Development*, 144 (4). S. 4018032. Verfügbar unter: doi:10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000463
- ZWICK, F., KUEHNEL, N., MOECKEL, R., AXHAUSEN, K.W. (2021): *Ride-Pooling Efficiency in Large, Medium-Sized and Small Towns -Simulation Assessment in the Munich Metropolitan Region*. In: *Procedia Computer Science*, 184. S. 662-667. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procs.2021.03.083
- ZWICK, F., WILKES, G., ENGELHARDT, R., AXER, S., DANDL, F., ET AL. (2022): *Mode choice and ride-pooling simulation: A comparison of mobiTopp, Fleetpy, and MATSim*. In: *Procedia Computer Science*, 201. S. 608-613. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procs.2022.03.079

Abkürzungsverzeichnis

AE	Zu- und Abgangszeit
Bhf	Bahnhof
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
C	Kosten
CNL	Cross Nested Logit Modell
CO₂	Kohlenstoffdioxid
EVNM-PV	Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen für den Personenverkehr
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
H KRipoo	Hinweise für Kenngrößen zur Beschreibung und Bewertung von Ridepooling-Systemen
IIA	Independence of irrelevant alternatives
IV	Individualverkehr
Mex	Metropolexpress
MiD	Mobilität in Deutschland (MiD) ist eine bundesweite Befragung von Haushalten zu ihrem alltäglichen Verkehrsverhalten im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
MNL	Multinominales Logit Modell
NL	Nested Logit Modell
NT	Umsteigehäufigkeit
ÖV	Öffentlicher Verkehr
P+R	Park and Ride
P+R (Pkw)	Mit dem Pkw zurückgelegter Teil des Park and Ride
Pkw	Personenkraftwagen
Pkw-Mitf.	Pkw-Mitfahrende
Pkw-Selbstf.	Pkw-Selbstfahrende (d.h. als fahrende Person)
RS	Ridesharing
S-Deg	Stuttgart-Degerloch

S-Hbf	Stuttgart-Hauptbahnhof
SW	Schurwald
TT	Fahrtzeit
VAV	Fahrzeugautomatisierung
VRS	Verband Region Stuttgart
WT	Wartezeit
Zubr.	Zubringer

Formelverzeichnis

Mengen und Indizes

$d_t^p \in D^p$	Menge D^p der möglichen Ausprägungen der Personennachfrage eines Zeitintervalls d_t^p
$g \in G$	Menge G der Personengruppen g
$h \in H$	Menge H der Elemente h einer Nachfragevariation
$i \in I$	Menge I der Alternativen i
$i \in I_g$	Menge I der für Gruppe g verfügbaren Alternativen i
$j \in J$	Menge J der Nester j
$k \in K$	Menge K der Attribute k
$t \in T$	Menge T der Zeitintervalle t
$o \in Z, d \in Z$	Menge Z der Quellverkehrszellen o und Zielverkehrszellen d

Parameter

α_{ij}	Parameter, der den Grad der Zugehörigkeit von Alternative i zu Nest j angibt
β_{0gi}, β_{0i}	alternativenspezifische Konstante β_0 des Nutzens der Alternative i (für die Gruppe g)
β_k	generischer, alternativenübergreifender Parameter für das Attribut k zur Gewichtung des Nutzens der Attributwerte x_{ki} für das Attribut k der Alternativen i
β_{kgi}, β_{ki}	Parameter zur Gewichtung des Nutzens des Attributwerts x_{kgi} für das Attribut k der Alternative i (für die Gruppe g)
λ_j	nestspezifischer Skalierungsparameter des Nests j
μ	alternativenübergreifender Skalierungsparameter

Variablenbezeichner

C^{veh}	Fahrgastkapazität eines Fahrzeugs
C_{odtr}^{pool}	Bündelungskapazität der Route r für Personennachfrage der Relation von o nach d im Zeitintervall t
d_t^{delta}	Rundungsdifferenz der Nachfrage in Zeitintervall t

$d_{od}^{int}, d_{odt}^{int}$	ganzzahlig gerundete Nachfrage der Relation von o nach d (im Zeitintervall t)
$d_{od}^{makro}, d_{odt}^{makro}$	makroskopische Nachfrage der Relation von o nach d (im Zeitintervall t)
d^p	Personennachfrage
$\overline{d^{p,H}}$	mittlere Personennachfrage einer Nachfragevariation
d_h^p	Personennachfrage des Elements h
d_i^p	Personennachfrage in Zeitintervall t
d_{odt}^p, d_{odtr}^p	Personennachfrage der Relation von o nach d im Zeitintervall t (auf Route r)
d^{rest}, d_{od}^{rest}	Restnachfrage (der Relation von o nach d)
$d^{veh,o}$	Fahrzeuglastfahrten
$\overline{d_{makro}^{veh,o}}, \overline{d_{mikro}^{veh,o}}$	Mittelwert benötigter Fahrzeuglastfahrten nach makroskopischer bzw. mikroskopischer Berechnungsweise
$d_{odt}^{veh,o}, d_{odtr}^{veh,o}$	Fahrzeuglastfahrten der Relation von o nach d im Zeitintervall t (auf Route r)
ε_{gi}	stochastischer Nutzenanteil ε der Alternative i für die Gruppe g
$f(d_{odtr}^p)$	Nichtlinearer Anteil des Erwartungswerts benötigter Fahrzeuglastfahrten in Abhängigkeit der erwarteten Personennachfrage
k_{odt}	Wert für Verteilungskriterium der Relation von o nach d im Zeitintervall t
n_T	Zeitintervallanzahl
n_H	Anzahl der Elemente einer Nachfragevariation
n_{Var}	Anzahl möglicher Nachfragevariationen
P_{gi}, P_i	Wahrscheinlichkeit p , dass eine Person (der Gruppe g) Alternative i wählt
$P_{i/j}$	Wahrscheinlichkeit p , dass in Nest j Alternative i gewählt wird
P_j	Wahrscheinlichkeit p , dass Nest j gewählt wird
r_t	normierter Rundungsfehler des Zeitintervalls t
u_{gi}	personenbezogener Gesamtnutzen u der Alternative i für die Gruppe g
v_{gi}, v_i	deterministischer Nutzenanteil v der Alternative i (für die Gruppe g)

v_j	nestspezifischer Nutzenanteil des Nests j
x_{kgi}, x_{ki}	Wert x des Attributs k der Alternative i (für die Gruppe g)
z_{odt}	Zufallszahl der Relation von o nach d im Zeitintervall t

Anhang

Anhang 1 Runden: Differenzplots der Berechnungen ohne Zufallskomponente

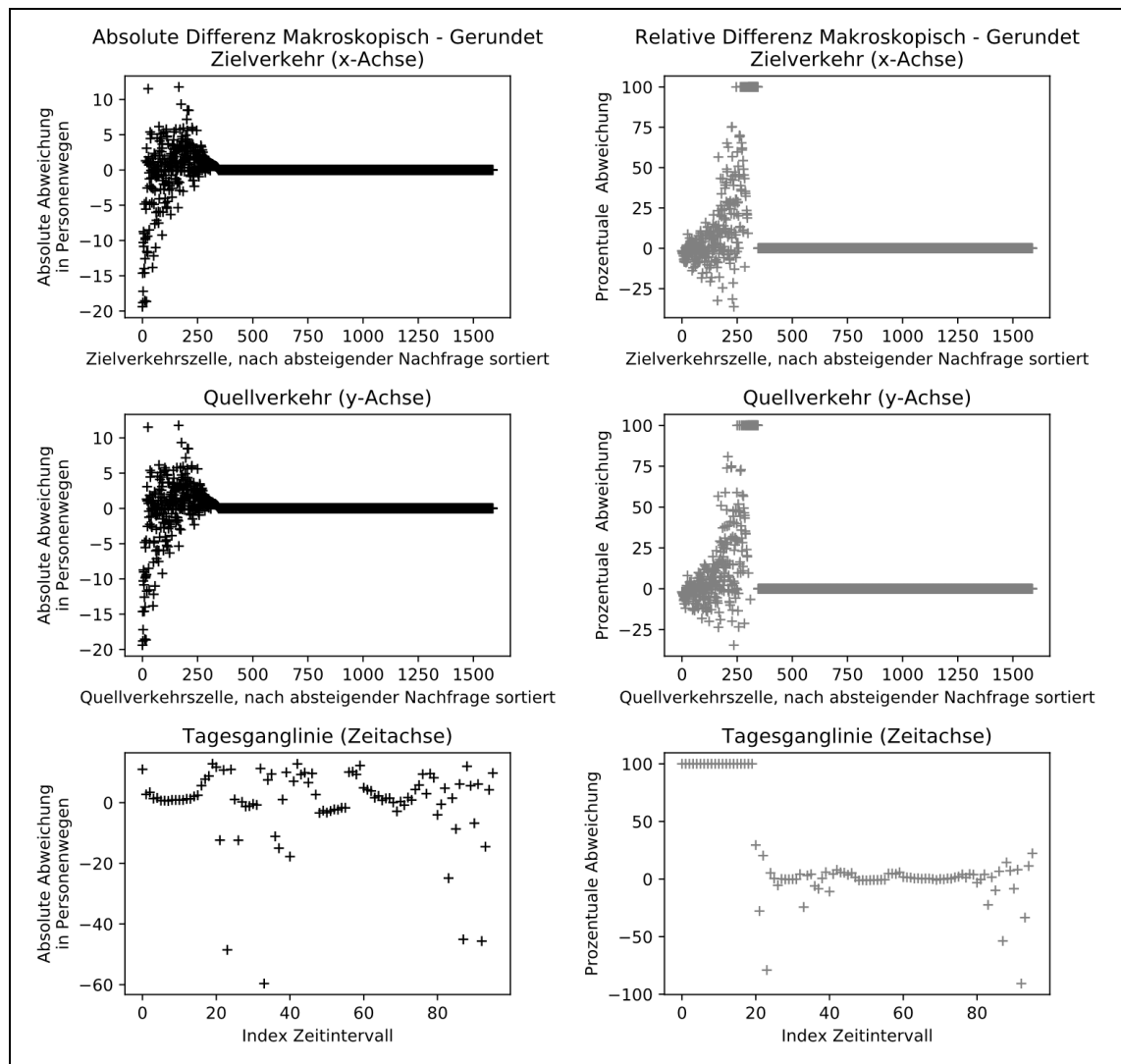


Abbildung 55: Differenzplots makroskopischer und gerundeter Nachfrage entsprechend Abbildung 20, S. 84. Rundung ohne Zufallszahl. Die Differenz der Gesamtnachfrage liegt bei weniger als einem Personenweg.

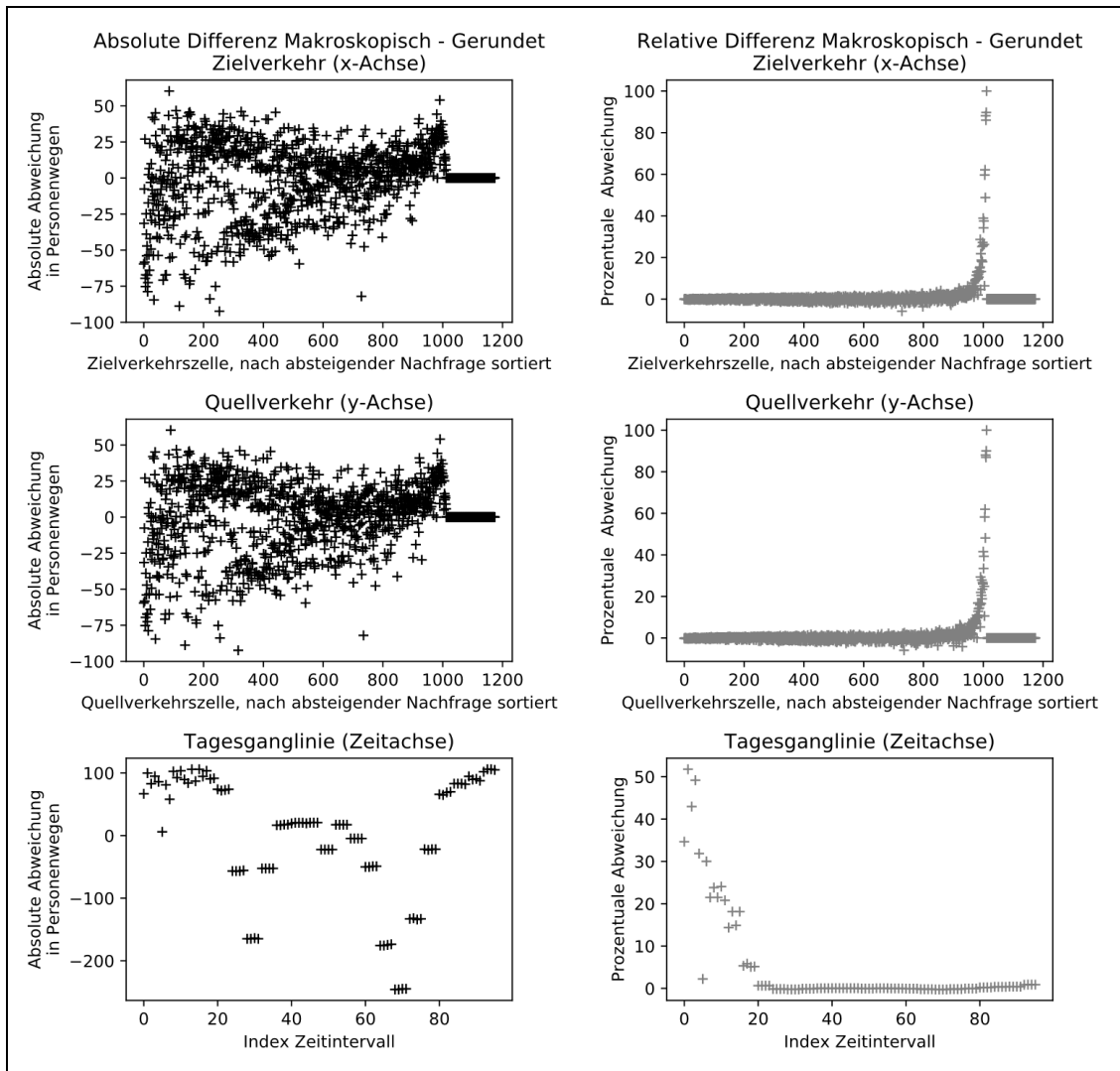


Abbildung 56: Differenzplots makroskopischer und gerundeter Nachfrage entsprechend Abbildung 22, S. 86. Rundung ohne Zufallszahl. Die Differenz der Gesamtnachfrage liegt bei weniger als einem Personenweg.

Anhang 2 Erhebung: Umfragedesign

Hinweis: In der Umfrage wurde die Bezeichnung „Ridepooling“ anstatt „Ridesharing“ genutzt.

Umfragezeitraum: Die Umfrage konnte zwischen 21.05.2021 und 11.06.2021 beantwortet werden.

Willkommenstext

Ridepooling als neues Verkehrsangebot

Sehr geehrte Teilnehmende!

In dieser Umfrage geht es um Ridepooling als neues Verkehrsangebot. Bitte nehmen Sie sich 10 bis 15 Minuten Zeit für die Beantwortung der Fragen, die im Rahmen einer Forschungsarbeit dazu verwendet werden ein Moduswahlmodell zu erstellen. Nachstehend erhalten Sie weiterführende Informationen zur folgenden Befragung.

– Falls Sie aber lieber sofort starten wollen und diese zusätzlichen Infos einfach überspringen, ist auch das problemlos möglich. –

Hintergrund und Motivation:

Wenn Sie von einem Ort zum anderen möchten, stehen Sie heutzutage wahrscheinlich vor folgender Entscheidung: Sie könnten zu Fuß gehen oder mit dem Fahrrad, mit Öffentlichen Verkehrsmitteln (also Bus oder Bahn) oder mit dem eigenen Pkw fahren.

In Zukunft könnte mit Ridepooling (auch Ridesharing, Sammeltaxi oder Carpooling genannt) noch eine weitere Möglichkeit dazukommen. Sie könnten dabei eine taxiähnliche Fahrt buchen, die Sie jedoch unter Umständen mit anderen Fahrgästen teilen müssen.

In den USA gibt es mit UberPool und Lyft Line bereits Ridepooling-Angebote. In Deutschland wird Ridepooling zurzeit nur in einzelnen Städten durch Anbieter wie z.B. MOIA oder Clever Shuttle erprobt.

Vor allem in Hinblick auf die zunehmende Automatisierung von Fahrzeugen scheinen diese Angebote immer attraktiver zu werden. Um mögliche negative Effekte und Problempunkte eines etablierten und flächendeckenden Ridepooling-Angebots zu identifizieren und zu vermeiden bzw. positive Effekte zu fördern, ist es notwendig frühzeitig die entstehenden Wirkungen zu untersuchen. So können rechtzeitig steuernde Maßnahmen ergriffen werden.

Hier am Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik wird an Modellen zur Berechnung der Wirkungen solcher neuer Angebotsformen gearbeitet. Um die im Modell abgebildeten Entscheidungen gut an die Realität anzugleichen, werden Informationen benötigt, wann sich Verkehrsteilnehmende (also Sie) für welches Angebot entscheiden. Zu diesem Zweck werden Befragungen wie diese durchgeführt – und je mehr Personen daran teilnehmen, desto besser.

Was Sie erwartet:

Nach einigen kurzen Eingangsfragen werden Ihnen im Hauptteil der Befragung 10 hypothetische Entscheidungssituationen gezeigt, in denen Sie sich jeweils zwischen Pkw, Öffentlichen Verkehrsmitteln, Ridepooling, Fahrrad oder Fuß entscheiden sollen. Den Abschluss bilden einige demografische Angaben, um abzuschätzen wie repräsentativ die Umfrageergebnisse sind und ob es personengruppenspezifische Besonderheiten gibt. Dabei werden keine Rückschlüsse auf Sie als einzelne Person gezogen.

Was mit den Ergebnissen passiert:

Die Ergebnisse dieser Umfrage werden im Rahmen einer Dissertation verwendet, die sich damit beschäftigt, Ridepooling-Angebote in bestehende Verkehrsnachfragemodelle zu integrieren. Anhand Ihrer Antworten (und denen vieler weiterer Teilnehmenden) kann ein Moduswahlmodell erstellt werden, das Auskunft darüber gibt, wie sich Verkehrsteilnehmende entscheiden. Darauf aufbauend ist es möglich, abzuschätzen, welche Formen des Ridepooling-Angebots wünschenswerte oder auch unerwünschte Effekte haben.

Kontakt:

[...]

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Referenzweg

Referenzweg

Um Ihnen die Vorstellung zu erleichtern, sollten Sie in den Entscheidungssituationen möglichst einen für Sie typischen Weg im Hinterkopf behalten. Die Auswahlmöglichkeiten werden zwar nicht Ihrer Realität entsprechen, aber Sie sollen sich vorstellen, dass Sie die angebotenen Verkehrsmittel für den im folgenden festgelegten Referenzweg nutzen.

Falls sich bei Ihnen durch die Pandemie große Veränderungen in Ihrem Mobilitätsverhalten ergeben haben, denken Sie bitte an die Zeit vor der Pandemie zurück.

Welchem Wegezweck möchten Sie Ihren Referenzweg zuordnen?

Bitte wählen Sie einen regelmäßig zurückgelegten Weg, für den Sie bisher entweder das Fahrrad, Öffentliche Verkehrsmittel (z.B. Bus und/oder Bahn) oder den Pkw nutzen.

ⓘ Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- Arbeit
- Schule/Uni/Ausbildungsstätte
- Sport/Freizeit
- Einkaufen
- Sonstiges

Wie legen Sie Ihren Referenzweg bisher zurück?

Wenn Sie mehrere Verkehrsmittel auf Ihrem Weg nutzen, ordnen Sie Ihren Weg bitte dem Hauptverkehrsmittel zu.

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- mit dem Pkw
- mit Öffentlichen Verkehrsmitteln
- mit dem Fahrrad

Alternative Pkw:

Wie lang ist Ihre Fahrtzeit im Fahrzeug? (Fußweg zum Pkw nicht einberechnet)

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- kürzer als 5 Minuten
- 5 bis 25 Minuten
- länger als 25 Minuten

Alternative ÖV:

Wie lang ist Ihre Fahrtzeit im Fahrzeug? (Fußweg zur Haltestelle und Wartezeiten nicht einberechnet)

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- kürzer als 5 Minuten
- 5 bis 20 Minuten
- länger als 20 Minuten

Alternative Rad:

Wie lang ist Ihre Fahrtzeit?

ⓘ Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- kürzer als 15 Minuten
- 15 bis 50 Minuten
- länger als 50 Minuten

Pkw-Verfügbarkeit

Steht Ihnen ein Pkw zur Verfügung?

Ja Nein

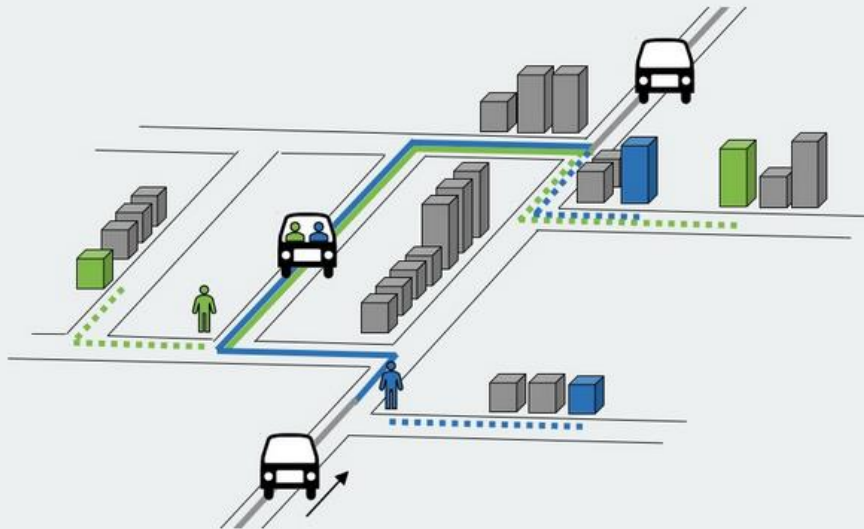
Erläuterung Ridesharing

Erläuterung Ridepooling

Beim Ridepooling fahren Personen, die ähnliche Start- und/oder Zielpunkte haben, gemeinsam in einem Fahrzeug. Um zusätzliche Personen abzuholen, werden bis zu einem gewissen Grad auch Umwege in Kauf genommen.

Im Rahmen dieser Umfrage soll es sich bei dem Fahrzeug um einen Kleinbus handeln, der insgesamt bis zu sechs Fahrgäste aufnehmen kann. Da das Fahrzeug nicht selbst gesteuert werden muss, kann die Fahrzeit wie in Bus, Bahn oder Taxi auch für andere Tätigkeiten, zum Beispiel zum Arbeiten, verwendet werden.

Vom Buchungsablauf her handelt es sich um einen taxiähnlichen Dienst, bei dem Sie im Voraus einen Fahrtwunsch buchen können (beispielsweise per App oder Telefon). Daraufhin werden Ihnen ein Abholort und eine voraussichtliche Abholzeit mitgeteilt. Der Abholort befindet sich meist wenige Gehminuten von Ihrem gewünschten Startort entfernt.



Erläuterung Entscheidungssituationen

Erläuterung Entscheidungssituationen

Im Folgenden werden Sie in Hinblick auf Ihren Referenzweg vor 10 Entscheidungssituationen gestellt, bei denen Sie jeweils eine von drei angebotenen Alternativen wählen müssen. Die möglichen Alternativen und deren dargestellte Eigenschaften werden im Folgenden kurz beschrieben.

Je nach Entscheidungssituation können zur Auswahl stehen:

Fuß, Fahrrad, Öffentliche Verkehrsmittel (ÖV), Pkw, Ridepooling.

Wie eingangs erwähnt, sollten Sie als Realitätsbezug möglichst Ihren Referenzweg im Hinterkopf behalten. Die dargestellten Auswahlmöglichkeiten können jedoch von Ihrer Realität abweichen und beinhalten unter Umständen nicht alle Möglichkeiten, die Ihnen real zu Verfügung stehen. Fehlt Ihnen eine Alternative, die Sie lieber wählen würden, wählen Sie stattdessen die nächstbeste angebotene Alternative. Es sind hypothetische Situationen, die dazu dienen Ihr Wahlverhalten zu analysieren.

Ihnen werden jeweils folgende Eigenschaften gegeben:

Gesamtzeit:

Summe aus *Fahrt- bzw. Gehzeit, Zu- und Abgangszeit* und *Wartezeit*.

Fahrt- bzw. Gehzeit:

Die Zeit, die Sie im Fahrzeug verbringen, Fahrrad fahren bzw. zu Fuß gehen.

Zu- und Abgangszeit:

Die Summe der Zeit, die Sie benötigen, um von Ihrem Startpunkt zu Fahrrad/Pkw/ÖV-Haltestelle /Ridepooling-Abholpunkt zu gehen und am Ende Ihrer Fahrt zu Ihrem Ziel zu gehen.

Wartezeit:

Zeit, die Sie an der ÖV-Haltestelle/dem Ridepooling-Abholpunkt warten.

Besonderheit Ridepooling: Eine Wartezeit von 0 min bedeutet, dass das Fahrzeug auf Sie wartet.

Umsteigehäufigkeit:

Anzahl der Umstiege auf diesem Weg im ÖV.

Kosten:

Fahrtpreis für ÖV bzw. Ridepooling. Bei Pkw überschlägige Verbrauchskosten und Parkkosten für diese Fahrt. Anschaffungskosten, Steuer, Versicherungen, etc. sind nicht enthalten.

Automatisierung (Ridepooling):

Gibt an, ob das Fahrzeug von einem Fahrer gefahren wird (*mit Fahrer*) oder voll automatisiert (autonom, ohne Fahrer) fährt (*automatisiert fahrend*). Für die automatisiert fahrenden Fahrzeuge wird von ähnlichem Fahrverhalten und Geschwindigkeiten wie bei heutigen Fahrern ausgegangen.

Zehn Entscheidungssituationen

Auswahl eines Fragensets je Teilnehmendem entsprechend Tabelle 18. Die zugehörigen Attributwerte der Entscheidungssituationen können je nach Fragenset Tabelle 19 entnommen werden.

Beispielhafte Entscheidungssituation:

Entscheidungssituation 6 von 10

Für alle Entscheidungssituationen gilt: Gehen Sie davon aus, dass es bewölkt bei mittlerer Temperatur und ohne Niederschlag ist. Gehen Sie davon aus, dass es keine Einschränkungen durch die Pandemie gibt. Behalten Sie Ihren Referenzweg im Hinterkopf.

Ihnen stehen die folgenden drei Alternativen zur Wahl. Welche würden Sie wählen?

	Öffentliche Verkehrsmittel	Pkw	Ridepooling
Gesamtzeit	35 min	16 min	20 min
Fahrt- bzw. Gehzeit	20 min	15 min	15 min
Zu- und Abgangszeit	5 min	1 min	5 min
Wartezeit	10 min	---	0 min
Umsteigehäufigkeit	0 x Umst.	---	---
Kosten	2 Euro	3 Euro	3 Euro
Automatisierung	---	---	mit Fahrer
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Referenzweg: Länge qualitativ	Referenzweg: Fahrzeit	Pkw-Verfügbarkeit	Fragenset
kurz	Pkw: < 5 min ÖV: < 5 min Rad: < 15 min	ja	01_Lang_MitPkw
		nein	02_Lang_OhnePkw
mittel	Pkw: 5...25 min ÖV: 5...20 min Rad: 15...50 min	ja	03_Mittel_MitPkw
		nein	04_Mittel_OhnePkw
lang	Pkw: > 25 min ÖV: > 20 min Rad: > 50 min	ja	05_Kurz_MitPkw
		nein	06_Kurz_OhnePkw

Tabelle 18: Zuordnung der Fragensets nach Referenzweglänge und Pkw-Verfügbarkeit.

Fragenset	Frage-Nr.	Rad		ÖV		Pkw		Ridesharing				Fuß				
		TT	EA	TT	EA	WT	NT	C	TT	EA	WT	VAV	C	TT		
01_Lang_MitPkw	1	70 min	1 min	30 min	12 min	10 min	0	5€	---	---	40 min	10 min	10 min	mit Fahrpersonal	5€	---
	2	---	---	30 min	5 min	10 min	0	3€	3 min	---	40 min	2 min	0 min	mit Fahrpersonal	3€	---
	3	50 min	1 min	30 min	12 min	10 min	2	3€	---	---	40 min	10 min	10 min	fahrerlos	3€	---
	4	---	---	20 min	5 min	10 min	2	5€	3 min	---	40 min	10 min	0 min	fahrerlos	5€	---
	5	---	---	15 min	12 min	10 min	2	3€	1 min	---	30 min	10 min	0 min	fahrerlos	3€	---
	6	---	---	30 min	12 min	5 min	0	5€	1 min	---	40 min	2 min	0 min	fahrerlos	5€	---
	7	---	---	15 min	5 min	10 min	0	5€	3 min	---	30 min	2 min	0 min	fahrerlos	5€	---
	8	50 min	2 min	30 min	12 min	5 min	2	5€	---	---	30 min	10 min	10 min	mit Fahrpersonal	5€	---
	9	---	---	15 min	12 min	5 min	0	3€	3 min	---	40 min	2 min	10 min	fahrerlos	3€	---
	10	---	---	30 min	5 min	5 min	2	3€	1 min	---	40 min	10 min	0 min	mit Fahrpersonal	3€	---
02_Lang_OhnePkw	1	50 min	1 min	15 min	5 min	10 min	2	3€	---	---	40 min	2 min	0 min	mit Fahrpersonal	3€	---
	2	70 min	1 min	15 min	12 min	5 min	0	5€	---	---	30 min	2 min	5 min	fahrerlos	5€	---
	3	50 min	2 min	30 min	12 min	10 min	2	3€	---	---	40 min	5 min	5 min	fahrerlos	5€	---
	4	70 min	2 min	20 min	5 min	10 min	0	3€	---	---	20 min	2 min	10 min	fahrerlos	5€	---
	5	90 min	2 min	20 min	5 min	5 min	0	3€	---	---	30 min	10 min	0 min	fahrerlos	3€	---
	6	90 min	2 min	15 min	12 min	5 min	0	3€	---	---	20 min	5 min	0 min	mit Fahrpersonal	5€	---
	7	70 min	1 min	30 min	5 min	5 min	2	5€	---	---	30 min	2 min	5 min	mit Fahrpersonal	5€	---
	8	90 min	2 min	15 min	5 min	10 min	2	5€	---	---	20 min	10 min	0 min	fahrerlos	5€	---
	9	50 min	1 min	20 min	12 min	5 min	2	3€	---	---	20 min	5 min	10 min	mit Fahrpersonal	3€	---
	10	50 min	1 min	30 min	12 min	10 min	0	5€	---	---	40 min	10 min	10 min	mit Fahrpersonal	5€	---
03_Mittel_MitPkw	1	---	---	10 min	15 min	5 min	0	4€	---	---	15 min	1 min	10 min	mit Fahrpersonal	5€	30 min
	2	---	---	10 min	15 min	5 min	2	2€	15 min	3 min	15 min	5 min	0 min	mit Fahrpersonal	5€	---
	3	---	---	25 min	5 min	5 min	2	4€	15 min	1 min	15 min	15 min	0 min	mit Fahrpersonal	5€	---
	4	30 min	1 min	25 min	15 min	10 min	2	4€	---	---	---	---	---	---	---	40 min
	5	20 min	1 min	---	---	---	---	---	---	---	30 min	15 min	0 min	mit Fahrpersonal	3€	30 min
	6	---	---	20 min	5 min	10 min	0	2€	15 min	1 min	15 min	5 min	0 min	fahrerlos	3€	---
	7	---	---	25 min	15 min	5 min	0	2€	---	---	20 min	15 min	10 min	fahrerlos	5€	40 min
	8	20 min	2 min	20 min	15 min	10 min	2	2€	---	---	30 min	5 min	10 min	mit Fahrpersonal	3€	---
	9	---	---	25 min	15 min	10 min	0	2€	25 min	3 min	30 min	1 min	0 min	fahrerlos	5€	---
	10	---	---	10 min	5 min	5 min	2	4€	25 min	1 min	---	---	---	---	---	40 min

Hinweise: Fahrzeit TT, Zu- und Abgangszeit AE, Wartezeit WT, Umsteigehäufigkeit NT, Kosten C, Fahrzeugautomatisierung VAV
 (Tabelle wird auf nächster Seite fortgesetzt)

Fragenset	Frage-Nr.	Rad		ÖV		Pkw		Ridesharing				Fuß				
		TT	EA	TT	EA	WT	NT	C	TT	EA	WT	VAV	C	TT		
04_Mittel_OhnePkw	1	---	---	20 min	15 min	10 min	0	4€	---	---	30 min	1 min	0 min	fahrerlos	5€	30 min
	2	---	---	25 min	5 min	10 min	0	2€	---	---	15 min	15 min	5 min	mit Fahrpersonal	5€	40 min
	3	---	---	20 min	5 min	5 min	2	4€	---	---	20 min	1 min	10 min	mit Fahrpersonal	5€	30 min
	4	30 min	1 min	25 min	15 min	5 min	0	4€	---	---	20 min	15 min	10 min	---	5€	---
	5	---	---	10 min	15 min	5 min	0	2€	---	---	15 min	5 min	10 min	fahrerlos	3€	30 min
	6	30 min	2 min	---	---	---	---	---	---	---	30 min	15 min	10 min	fahrerlos	5€	40 min
	7	20 min	2 min	---	---	---	---	---	---	---	30 min	15 min	0 min	mit Fahrpersonal	3€	30 min
	8	30 min	1 min	25 min	15 min	10 min	2	2€	---	---	30 min	5 min	10 min	mit Fahrpersonal	3€	---
	9	20 min	1 min	20 min	15 min	5 min	2	2€	---	---	20 min	15 min	0 min	fahrerlos	5€	---
	10	20 min	1 min	10 min	15 min	10 min	2	4€	---	---	---	---	---	---	---	40 min
05_Kurz_MitPkw	1	---	---	---	---	---	---	---	1€	3 min	1 min	---	---	fahrerlos	4€	10 min
	2	20 min	1 min	10 min	12 min	10 min	1	3€	---	---	---	---	---	---	---	30 min
	3	---	---	3 min	5 min	10 min	0	1€	---	---	3 min	2 min	5 min	mit Fahrpersonal	2€	10 min
	4	---	---	10 min	5 min	5 min	1	1€	---	---	---	---	---	mit Fahrpersonal	4€	30 min
	5	---	---	---	---	---	---	---	---	3 min	3 min	---	---	fahrerlos	2€	10 min
	6	---	---	15 min	5 min	5 min	0	3€	---	---	10 min	10 min	0 min	fahrerlos	4€	---
	7	---	---	15 min	12 min	5 min	1	1€	---	---	15 min	3 min	0 min	fahrerlos	2€	---
	8	5 min	2 min	3 min	12 min	5 min	0	1€	---	---	3 min	10 min	0 min	mit Fahrpersonal	4€	---
	9	5 min	1 min	3 min	12 min	5 min	0	3€	---	---	3 min	5 min	10 min	fahrerlos	4€	---
	10	---	---	15 min	12 min	10 min	0	1€	---	---	15 min	5 min	10 min	mit Fahrpersonal	4€	30 min
06_Kurz_OhnePkw	1	---	---	3 min	12 min	5 min	0	1€	---	---	---	---	---	mit Fahrpersonal	2€	10 min
	2	10 min	1 min	10 min	5 min	10 min	1	1€	---	---	3 min	10 min	10 min	fahrerlos	2€	---
	3	10 min	2 min	3 min	5 min	10 min	0	3€	---	---	---	---	---	---	---	20 min
	4	5 min	2 min	3 min	12 min	10 min	0	1€	---	---	3 min	5 min	10 min	fahrerlos	4€	---
	5	5 min	1 min	3 min	12 min	5 min	0	3€	---	---	3 min	10 min	10 min	mit Fahrpersonal	4€	---
	6	20 min	1 min	15 min	12 min	10 min	1	3€	---	---	---	---	---	---	---	30 min
	7	---	---	10 min	12 min	5 min	1	1€	---	---	15 min	2 min	10 min	fahrerlos	2€	30 min
	8	---	---	15 min	5 min	5 min	0	1€	---	---	3 min	2 min	10 min	mit Fahrpersonal	4€	30 min
	9	20 min	2 min	15 min	12 min	10 min	0	1€	---	---	15 min	10 min	10 min	mit Fahrpersonal	2€	---
	10	---	---	15 min	5 min	5 min	0	3€	---	---	10 min	10 min	0 min	fahrerlos	4€	30 min

Hinweise: Fahrzeit TT, Zu- und Abgangszeit AE, Wartezeit WT, Umsteigezeit NT, Kosten C, Fahrzeugautomatisierung VAV

Tabelle 19: Attributausprägungen je Fragenset und Frage der Erhebung.

Soziodemographische Merkmale

Hinweis: Ein Überspringen dieser Fragengruppe war auch ohne Antworten möglich.

Zur personengruppenbezogenen Auswertung und der Beurteilung, wie repräsentativ die Befragungsergebnisse sind, werden abschließend noch einige Informationen zu Ihrer Person benötigt.

Wie alt sind Sie?

ⓘ Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- unter 18 Jahre
- 18-29 Jahre
- 30-39 Jahre
- 40-49 Jahre
- 50-59 Jahre
- 60-75 Jahre
- über 75 Jahre

Geschlecht

ⓘ Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- Männlich
- Weiblich
- Divers

Wie viele Einwohner hat ihr Wohnort?

ⓘ Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- < 10.000
- 10.000-50.000
- 50.000-500.000
- > 500.000

Zu welcher der folgenden Personengruppen zählen Sie sich?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- Erwerbstätig Vollzeit
- Erwerbstätig Teilzeit
- Nicht-Erwerbstätig
- Schüler*in
- Auszubildende*r
- Student*in
- Rentner*in

Was ist Ihr höchster Bildungsabschluss?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- Kein Schulabschluss
- Hauptschule
- Realschule (mittlere Reife)
- Gymnasium (Abitur)
- Ausbildung
- Hochschule

Endnachricht

Bitte beenden Sie die Umfrage, indem Sie den "Absenden" Button drücken.

Falls Sie noch Kommentare oder Anregungen haben, können Sie diese gerne im untenstehenden Textfeld hinterlassen.

Anhang 3 Erhebung: Ergebnisse der erweiterten Parameterschätzung

Untersuchte Eigenschaft	Parameter	Schätzwert	Standardabweichung	t-Wert zur Nullhypothese
	beta_0_Pkw	-6,01289	1,04696	-5,7432
Teilnehmende: Tätigkeit	beta_0_Pkw_shift_RefErwerbVoll	0	NA	NA
	beta_0_Pkw_shift_RefErwerbTeil	-0,09716	0,66599	-0,1459
	beta_0_Pkw_shift_RefStudium	-2,19012	0,84373	-2,5958
	beta_0_Pkw_shift_RefRente	-0,42623	0,91041	-0,4682
	beta_0_Pkw_shift_RefTätigkSonst	4,14748	1,35693	3,0565
Teilnehmende: Geschlecht	beta_0_Pkw_shift_weibl	0,02080	0,36251	0,0574
Bearbeitetes Fragenset	beta_0_Pkw_shift_Frageset01	-0,61967	0,94536	-0,6555
	beta_0_Pkw_shift_Frageset03	0	NA	NA
	beta_0_Pkw_shift_Frageset05	1,47198	1,19946	1,2272
Referenzweg: Modus	beta_0_Pkw_shift_RefPkw	6,06701	0,66595	9,1104
	beta_0_Pkw_shift_RefÖV	3,66244	0,61811	5,9252
	beta_0_Pkw_shift_RefRad	0	NA	NA
Referenzweg: Wegezweck	beta_0_Pkw_shift_RefArbeit	0	NA	NA
	beta_0_Pkw_shift_RefBildung	2,78024	0,88530	3,1405
	beta_0_Pkw_shift_RefEinkauf	2,91290	0,78686	3,7019
	beta_0_Pkw_shift_RefSport	-0,06439	0,54035	-0,1192
	beta_0_Pkw_shift_RefZweckSonst	3,88481	1,61076	2,4118
	beta_0_ÖV	-2,83907	1726,20579	-0,0016
Teilnehmende: Tätigkeit	beta_0_ÖV_shift_RefErwerbVoll	0	NA	NA
	beta_0_ÖV_shift_RefErwerbTeil	-0,88925	0,59620	-1,4915
	beta_0_ÖV_shift_RefStudium	-1,41328	0,59312	-2,3828
	beta_0_ÖV_shift_RefRente	0,03458	0,70490	0,0491
	beta_0_ÖV_shift_RefTätigkSonst	3,28612	1,17012	2,8084
Teilnehmende: Geschlecht	beta_0_ÖV_shift_weibl	-0,31099	0,29844	-1,0421
Bearbeitetes Fragenset	beta_0_ÖV_shift_Frageset01	-0,24833	0,91070	-0,2727
	beta_0_ÖV_shift_Frageset02	-1,38146	1726,20615	-0,0008
	beta_0_ÖV_shift_Frageset03	0	NA	NA
	beta_0_ÖV_shift_Frageset04	-0,12299	1726,20587	-0,0001
	beta_0_ÖV_shift_Frageset05	1,18535	1,09795	1,0796
	beta_0_ÖV_shift_Frageset06	-0,96535	1726,20592	-0,0006
Teilnehmende: Pkw-Verfügbarkeit	beta_0_ÖV_shift_PkwVerfügbar	-0,36927	1726,20599	-0,0002
Referenzweg: Modus	beta_0_ÖV_shift_RefPkw	3,24594	0,60742	5,3438
	beta_0_ÖV_shift_RefÖV	3,70210	0,55000	6,7311
	beta_0_ÖV_shift_RefRad	0	NA	NA

(Tabelle wird auf nächster Seite fortgesetzt.)

Untersuchte Eigenschaft	Parameter	Schätzwert	Standardabweichung	t-Wert zur Nullhypothese
Referenzweg: Wegezweck	beta_0_ÖV_shift_RefArbeit	0	NA	NA
	beta_0_ÖV_shift_RefBildung	1,28047	0,62428	2,0511
	beta_0_ÖV_shift_RefEinkauf	2,28456	0,65839	3,4699
	beta_0_ÖV_shift_RefSport	-0,21912	0,47051	-0,4657
	beta_0_ÖV_shift_RefZweckSonst	1,21582	0,99123	1,2266
	beta_0_RS	-3,66433	1365,58833	-0,0027
Teilnehmende: Tätigkeit	beta_0_RS_shift_RefErwerbVoll	0	NA	NA
	beta_0_RS_shift_RefErwerbTeil	0,03629	0,55760	0,0651
	beta_0_RS_shift_RefStudium	-1,79116	0,60232	-2,9738
	beta_0_RS_shift_RefRente	-0,82923	0,71387	-1,1616
	beta_0_RS_shift_RefTätigkSonst	3,25458	1,19499	2,7235
Teilnehmende: Geschlecht	beta_0_RS_shift_weibl	-0,11563	0,30104	-0,3841
Bearbeitetes Fragenset	beta_0_RS_shift_Frageset01	-0,27150	0,92377	-0,2939
	beta_0_RS_shift_Frageset02	-1,95335	1365,58860	-0,0014
	beta_0_RS_shift_Frageset03	0	NA	NA
	beta_0_RS_shift_Frageset04	-0,07627	1365,58832	-0,0001
	beta_0_RS_shift_Frageset05	1,31037	1,13451	1,1550
	beta_0_RS_shift_Frageset06	-1,26917	1365,58853	-0,0009
Teilnehmende: Pkw-Verfügbarkeit	beta_0_RS_shift_PkwVerfügbar	-0,36555	1365,58849	-0,0003
Referenzweg: Modus	beta_0_RS_shift_RefPkw	3,96318	0,61901	6,4024
	beta_0_RS_shift_RefÖV	3,99613	0,56626	7,0570
	beta_0_RS_shift_RefRad	0	NA	NA
Referenzweg: Wegezweck	beta_0_RS_shift_RefArbeit	0	NA	NA
	beta_0_RS_shift_RefBildung	1,30579	0,63355	2,0611
	beta_0_RS_shift_RefEinkauf	3,27255	0,63069	5,1888
	beta_0_RS_shift_RefSport	0,31743	0,47111	0,6738
	beta_0_RS_shift_RefZweckSonst	1,67101	1,02384	1,6321
	beta_0_Rad	0	NA	NA
	beta_0_Fuß	-0,07917	NaN	NaN
Teilnehmende: Tätigkeit	beta_0_Fuß_shift_RefErwerbVoll	0	NA	NA
	beta_0_Fuß_shift_RefErwerbTeil	-0,30973	0,54508	-0,5682
	beta_0_Fuß_shift_RefStudium	-2,11568	0,61510	-3,4396
	beta_0_Fuß_shift_RefRente	-0,53455	0,73587	-0,7264
	beta_0_Fuß_shift_RefTätigkSonst	0,20738	1,29153	0,1606
Teilnehmende: Geschlecht	beta_0_Fuß_shift_weibl	0,05117	0,30893	0,1656
Bearbeitetes Fragenset	beta_0_Fuß_shift_Frageset03	0	NA	NA
	beta_0_Fuß_shift_Frageset04	0,84121	NaN	NaN
	beta_0_Fuß_shift_Frageset05	-0,31473	1,09446	-0,2876
	beta_0_Fuß_shift_Frageset06	-1,09676	NaN	NaN

(Tabelle wird auf nächster Seite fortgesetzt.)

Untersuchte Eigenschaft	Parameter	Schätzwert	Standardabweichung	t-Wert zur Nullhypothese
Teilnehmende: Pkw-Verfügbarkeit	beta_0_Fuß_shift_PkwVerfügbar	0,17638	NaN	NaN
Referenzweg: Modus	beta_0_Fuß_shift_RefPkw	1,43785	0,59382	2,4214
	beta_0_Fuß_shift_RefÖV	2,74579	0,52558	5,2243
	beta_0_Fuß_shift_RefRad	0	NA	NA
Referenzweg: Wegezweck	beta_0_Fuß_shift_RefArbeit	0	NA	NA
	beta_0_Fuß_shift_RefBildung	1,78488	0,63680	2,8029
	beta_0_Fuß_shift_RefEinkauf	2,24841	0,61830	3,6365
	beta_0_Fuß_shift_RefSport	0,05215	0,48552	0,1074
	beta_0_Fuß_shift_RefZweckSonst	2,39582	1,15506	2,0742
Fahrzeit	beta_TT_Rad	-0,20503	0,02973	-6,8952
	beta_TT_ÖV	-0,12394	0,01391	-8,9124
	beta_TT_RS	-0,13398	0,01528	-8,7689
	beta_TT_Pkw	-0,12061	0,01922	-6,2770
	beta_TT_Fuß	-0,26300	0,02089	-12,5916
Zu- und Abgangszeit	beta_AE	-0,14283	0,01436	-9,9464
Wartezeit	beta_WT_ÖV	-0,17140	0,03423	-5,0066
	beta_WT_RS	-0,10951	0,02007	-5,4557
Umsteigehäufigkeit	beta_NT	-0,60316	0,08449	-7,1386
Kosten	beta_C	-0,55295	0,05982	-9,2437
Fahrzeugautomatisierung	beta_VAV	-0,09834	0,15602	-0,6303

(Hinweis: grau entspricht nicht signifikant von Null verschiedenen Parameterwerten)

Tabelle 20: Ergebnisse der Parameterschätzung zur Moduswahl für ein Multinomiales Logit Modell mit erweiterter Nutzenfunktion.

Anhang 4 Erhebung: Verteilung der Merkmalskombinationen in der Stichprobe

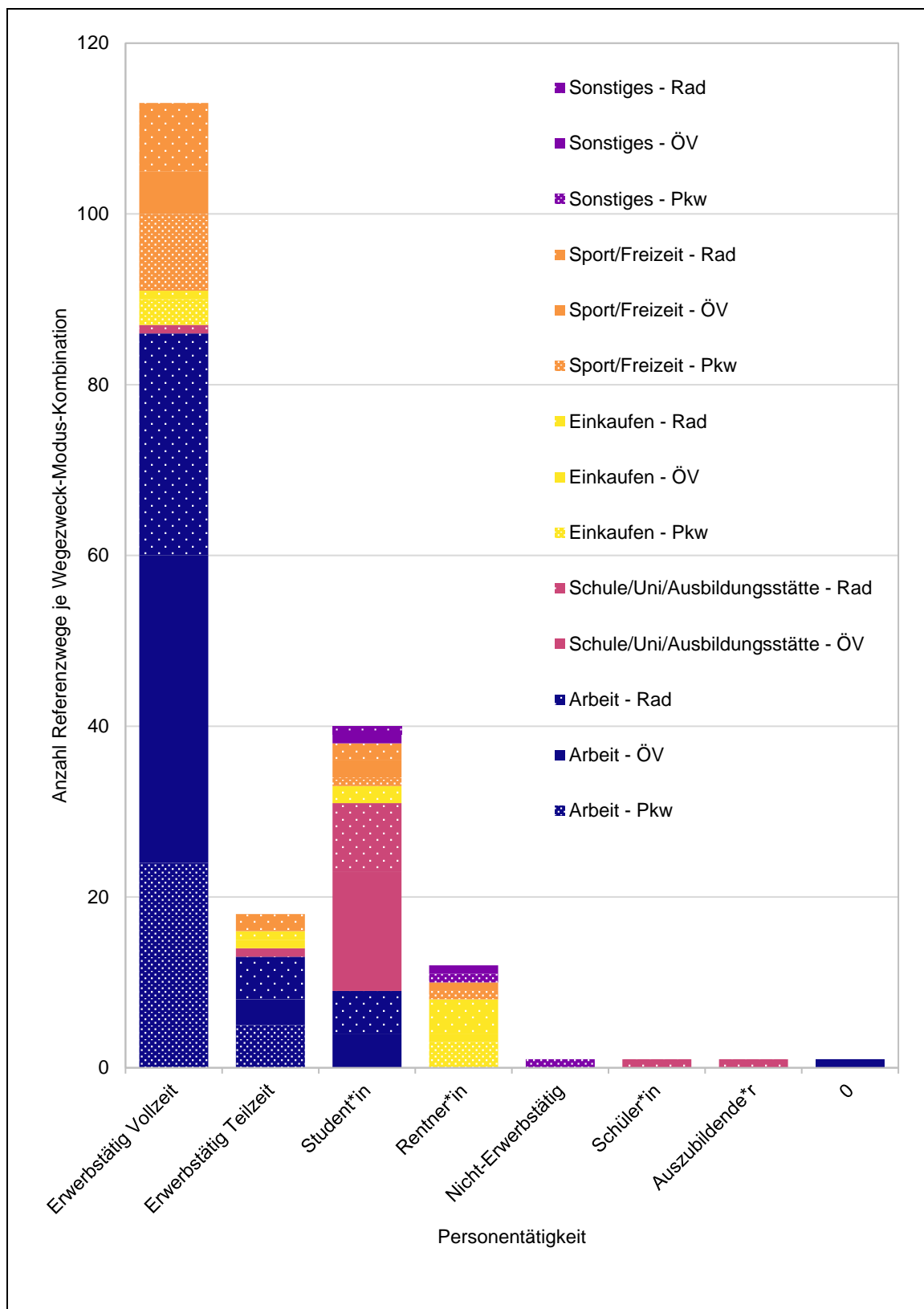


Abbildung 57: Verteilung der Merkmalskombinationen unter den Umfrageteilnehmenden. n = 187.

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 offenerporiger 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 Verkehrsnachfragemodellen	4/2022
Heft 62	Stefanie Lenke Standortanalysen mit Berücksichtigung der verkehrlichen Wirkungen	5/2022
Heft 63	Emely Richter Integration geteilter Fahrzeugflotten in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle	10/2022

The image features a complex abstract design. A large, solid blue rectangle occupies the top-left corner. To its right, a light blue area contains a network diagram with various nodes and connecting lines. Below the top-left blue rectangle is a large, light blue rectangular area. On the right side, there is a vertical blue bar. A smaller blue square is positioned at the intersection of the top-left blue rectangle and the vertical blue bar.

ISSN 0932 - 402X
ISBN 978 - 3 - 9821138 - 4 - 5
D 93 (Dissertation der Universität Stuttgart)