



Technische Universität München
TUM School of Engineering and Design

Einsatzmöglichkeiten von Managed Lanes auf deutschen Fernstraßen

Thomas Ferdinand Schönhofer

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der
Technischen Universität München zur Erlangung eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Klaus Bogenberger
2. Prof. Dr. Allister Loder

Die Dissertation wurde am 05.01.2024 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Engineering and Design am 22.05.2024 angenommen.

Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit den Einsatzmöglichkeiten und Potenzialen von Managed Lanes auf deutschen Fernstraßen, mit einem Fokus auf HOT-Lanes. Das bestehende Fernstraßennetz gerät in Deutschland, aber auch europaweit immer mehr an seine Kapazitätsgrenzen. Die Verkehrszahlen im Personen- wie auch im Güterverkehr steigen stetig an, wohingegen die Ausbau- und Neubauprojekte drastisch reduziert wurden. Die Folge sind Verkehrsnetze, die insbesondere im Umfeld prosperierender Metropolregionen an der Grenze ihrer Belastungsfähigkeit angekommen sind. Managed Lanes können hier ein Baustein zur effizienteren Nutzung der bestehenden Straßenquerschnitte sein. Diese Arbeit bietet einen Überblick über das weite Feld der Managed Lanes und entwickelt ein Verfahren zur Abschätzung der Potenziale von HOT-Lanes im deutschen Fernstraßennetz.

Die Arbeit beginnt mit einer intensiven Literaturrecherche zum derzeitigen Stand der Technik zu Managed Lanes weltweit. Systeme aus dem Umfeld der Managed Lanes kommen seit etwa den 1970er-Jahren weltweit zur Anwendung, wobei bislang kein Land vollumfänglich die Möglichkeiten unterschiedlicher Managed Lane Systeme nutzt, sondern jeweils nur einige wenige Verfahren zur Anwendung kommen. In Deutschland werden etwa aktuell dynamische Verkehrsbeeinflussungsanlagen, dynamische Seitenstreifenfreigaben und teilweise die Zuflussdosierung verwendet. Techniken, die einen höheren Besetzungsgrad fördern, wie HOV- oder HOT-Lanes kommen bisher nicht zum Einsatz.

Im zweiten Schritt der Arbeit wurde eine Umfrage unter deutschen Pendlern durchgeführt, um herauszufinden, ob und wenn ja unter welchen Bedingungen sie bereit wären, Fahrgemeinschaften zu bilden oder für Reisezeitvorteile zu bezahlen. Die so gewonnenen Daten wurden zum einen mittels klassischer statistischer Verfahren ausgewertet und zusätzlich noch mittels einer Strukturgleichungsmodellierung und der multinomialen logistischen Regression analysiert. Im Ergebnis konnten daraus zwei, für den deutschen Raum vollkommen neue, Ansätze zur Abschätzung der Potenziale einer HOT-Lane auf deutschen Fernstraßen entwickelt werden. Dabei handelt es sich zunächst um einen agentenbasierten Ansatz, der, wenn die persönlichen Daten in ausreichender Tiefe vorliegen, eine exakte Vorhersage zur Wahrscheinlichkeit bei der Verkehrsmittelwahl ermöglicht. Da diese Daten häufig nicht in vollem Umfang vorliegen, wurde ein zweiter, gebietsbasierter Ansatz entwickelt, der mit deutlich weniger Informationen auskommen, dabei aber nur rund 5 % von der exakten, agentenbasierten Nachfrageermittlung abweicht.

In einem mikroskopischen Verkehrsmodell wurde schließlich anhand eines synthetischen Streckennetzes untersucht, welche Auswirkungen sich auf einer Autobahn durch die Implementierung einer HOT-Lane in verschiedenen Szenarien ergeben. Hierzu wurden sowohl die Nachfrage als auch die Kostensätze der HOT-Lane variiert. Im Ergebnis lässt sich eine Zunahme von Fahrgemeinschaften von bis zu 15 % erreichen sowie eine Stärkung des ÖPNV. Dabei muss jedoch auch betont werden, dass HOT-Lanes Anwendungsgrenzen haben und kein Allheilmittel in der Verkehrsplanung sind.

Abstract

This dissertation explores the possibilities and potentials of managed lanes on German highways, with a focus on High-Occupancy Toll (HOT) lanes. The existing highway network in Germany, as well as across Europe, is increasingly reaching its capacity limits. Traffic volumes in both passenger and freight transport are steadily rising, while expansion and new construction projects have been significantly reduced. The result is transportation networks, especially in the vicinity of thriving metropolitan regions, that have reached the limits of their capacity. Managed lanes can serve as a component for the more efficient use of existing road cross-sections. This work provides an overview of the broad field of managed lanes and develops a method for estimating the potentials of HOT lanes in the German highway network.

The research begins with an extensive literature review on the current state of managed lanes technology worldwide. Systems related to managed lanes have been applied globally since the 1970s, yet no country has fully utilized the possibilities of various managed lane systems; only a few methods are typically implemented. In Germany, current practices include dynamic traffic control systems, dynamic shoulder lane releases, and partial ramp metering. Techniques that promote higher occupancy, such as High-Occupancy Vehicle (HOV) or HOT lanes, have not been implemented.

In the second phase of the study, a survey was conducted among German commuters to determine whether and under what conditions they would be willing to form carpool arrangements or pay for travel time advantages. The data obtained were analyzed using both classical statistical methods and additional structural equation modeling and multinomial logistic regression. The results yielded two entirely new approaches for estimating the potentials of HOT lanes on German highways. The first is an agent-based approach that allows for precise predictions of the probability of mode choice when personal data are available in sufficient depth. As these data are often not fully available, a second, area-based approach was developed, requiring significantly less information but deviating only around 5% from the precise agent-based demand assessment.

In a microscopic traffic model, the impact of implementing a HOT lane in various scenarios on a highway was examined using a synthetic network. Both demand and cost rates of the HOT lane were varied. The results indicate an increase in carpooling of up to 15% and a strengthening of public transportation. However, it is important to emphasize that HOT lanes have limitations and are not a panacea in transportation planning.

Inhaltsverzeichnis

1.	Potenziale von Managed Lanes in Deutschland und Europa	1
1.1	Verkehrsmittelwahl in Theorie und Praxis.....	1
1.2	Motivation.....	3
1.3	Forschungsfragen	4
1.4	Methodik und Aufbau	6
2.	Sonderfahrstreifen als Werkzeug der Verkehrsflussoptimierung	9
2.1	Grundlagen von Managed Lanes	9
2.2	Entwicklung der Managed Lanes	13
2.3	Arten von Managed Lanes	16
2.3.1	Fahrstreifen für mehrfachbesetzte Fahrzeuge (HOV-Lanes / HOT-Lanes) ..	16
2.3.2	Wechselverkehrsstreifen (Reversible Lanes).....	21
2.3.3	Seitenstreifenfreigabe (Hard Shoulder Running).....	24
2.3.4	Zuflussregelung (Ramp Metering)	26
2.3.5	Dynamische Straßennutzungsgebühren (Congestion Pricing)	29
2.4	Steuerung von Managed Lanes	33
2.4.1	Fahrstreifen für mehrfachbesetzte Fahrzeuge	33
2.4.2	Wechselverkehrsstreifen	34
2.4.3	Temporäre Seitenstreifenfreigabe	35
2.4.4	Zuflussregelung	36
2.4.5	Dynamische Straßennutzungsgebühren.....	39
2.5	Auswirkungen von Managed Lanes.....	41
2.5.1	Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge	42
2.5.2	Wechselverkehrsstreifen	44
2.5.3	Seitenstreifenfreigabe.....	45
2.5.4	Zuflussregelung	47
2.5.5	Dynamische Straßennutzungsgebühren.....	48
2.6	Umsetzungsgrade von Managed Lanes in Europa	50
2.7	Rahmenbedingungen von Managed Lanes in Europa und Deutschland	54
2.8	Zusammenfassung Sonderfahrstreifen.....	56
3.	Entwicklung einer Methodik zur Nachfrageschätzung einer HOT-Lane auf einer deutschen Autobahn.....	58
3.1	Grundlagen	58
3.1.1	Umfrage zu Potenzialen einer Managed Lane	58
3.1.2	Ergebnisse aus Strukturgleichungsmodellierung	67
3.1.3	Einflussfaktoren zur Nutzung von Managed Lanes	72

3.1.4	Kostenfunktionen von Managed Lanes	78
3.2	Theorien zum Wahlverhalten bei der Verkehrsmittelwahl	80
3.2.1	Rational Choice Theory	80
3.2.2	Theory of Planned Behavior	81
3.2.3	Theory of Constraints	82
3.2.4	Social Identity Theory	83
3.3	Entwicklung der Nachfragemodellierung	84
3.3.1	Multinominale logistische Regression	84
3.3.2	Agentenbasierter Ansatz	90
3.3.3	Gebietsbasierter Ansatz	98
3.3.4	Eingangsparameter	100
4.	Mikroskopische Simulation einer HOT-Lane anhand eines synthetischen Streckennetzes nach HBS	103
4.1	Aufbau der Simulation	104
4.2	Nachfrage	105
4.3	Kalibrierung und Validierung des Modells.....	108
4.4	Szenarien.....	109
4.4.1	Basis-Szenario	109
4.4.2	Szenario 100 % QSV D	111
4.4.3	Szenario 120 % QSV D	122
4.4.4	Szenario 80 % QSV D	132
4.5	Auswertung	142
4.5.1	Reisezeit und Reisezeitpotenziale	142
4.5.2	Modal Split.....	147
4.5.3	Kostensensitivität.....	150
4.6	Fundamentaldiagramme der Szenarien.....	153
4.6.1	Übersicht Fundamentaldiagramme	153
4.6.2	Datenerfassung im synthetischen Netz.....	156
4.6.3	Ergebnisse der Fundamentaldiagramme	157
4.7	Emissionen	162
4.7.1	CO ₂	163
4.7.2	NO _x	167
5.	Bewertung und Erkenntnisse mit Umsetzungsmöglichkeiten	170
5.1	Einordnung der Methodik	170
5.2	Einsatzmöglichkeiten und – Grenzen	174
5.3	Technische Ausstattung	179
5.4	Kosten und Amortisierung	185

5.5 Nutzung und Anordnung	188
6. Chancen und Ausblick	192
6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	192
6.2 Ausblick und nächste Schritte	196
Danksagung	199
Veröffentlichungen	200
Abkürzungsverzeichnis	201
Abbildungsverzeichnis	203
Tabellenverzeichnis	207
Literaturverzeichnis	209
Anhang A – Umfrage	227

1. Potenziale von Managed Lanes in Deutschland und Europa

Managed Lanes sind seit den 1970er-Jahren in unterschiedlichen Formen Bestandteil der Steuerungsmechanismen des Verkehrsmanagements. Weltweit haben sich dabei unterschiedliche Systeme entwickelt, die jeweils bestimmte Vor- und Nachteile haben. Stetig steigende Verkehrszahlen lassen auch das Interesse an Managed Lanes wachsen, die eine Möglichkeit darstellen, den bestehenden Straßenraum effizienter zu nutzen. Es stellt sich daher die Frage, welche Potenziale in verschiedenen Arten von Managed Lanes stecken und ob diese im deutschen und europäischen Fernstraßennetz zum Einsatz kommen können.

1.1 Verkehrsmittelwahl in Theorie und Praxis

Seit Ende des Zweiten Weltkrieges sind die Verkehrszahlen sowohl des Personenverkehrs als auch des Güterverkehrs stetig gewachsen (Statista 2023e). Bis Mitte der 1980er-Jahre wurde durch den Neubau und Ausbau von (Fern-) Straßen auch die Kapazität der Verkehrswege massiv erweitert. Der Straßenneubau ist seither weitestgehend zum Erliegen gekommen und auch die Erweiterung bestehender Verkehrswege wurden spürbar zurückgefahren (BMDV 2022). Strengere Umweltauflagen, fehlende Finanzmittel bei den Straßenbaulastträgern sowie ein geändertes Bewusstsein in unterschiedlichen Gesellschaftsschichten und ein geänderter Zeitgeist lassen hier in den nächsten Jahren auch keine Veränderung erwarten. Demgegenüber hat die Entwicklung der Verkehrszahlen insbesondere seit dem Fall des Eisernen Vorhangs eine auch für Experten kaum vorstellbare Dynamik erfahren. Durch seine zentrale Lage in Europa, die verstärkte Globalisierung von Waren- und Handelsströmen und einer positiven wirtschaftlichen Gesamtlage hat sich der Verkehr in Deutschland in den letzten 30 Jahren, von 136 Mrd. gefahrener Kilometer im Jahr 1990 auf 253 Mrd. gefahrener Kilometer im Jahr 2019 (Statista 2023e), grob gesagt verdoppelt, ohne dass die Kapazität im Netz dabei wesentlich gestiegen wäre. Die Folge ist ein Streckennetz, welches speziell in den prosperierenden Metropolregionen bereits heute am Rande seiner Leistungsfähigkeit ist oder sogar darüber hinaus belastet wird. Daraus resultiert ein sehr fragiles Gesamtsystem, in welchem bereits kleine Störungen, beispielsweise in Form von Baustellen oder Unfällen, ausreichen, um den Verkehrsfluss kollabieren zu lassen. Entgegen dem bereits erwähnten Umweltbewusstsein in der Bevölkerung deuten sämtliche Prognosen für die nächsten Jahre auf weiter wachsende Verkehrszahlen und damit verbundene Einschränkungen bei der Leichtigkeit des Verkehrs hin.

Interessanterweise führt der aktuelle Zeitgeist, der Themengebiete wie Umweltschutz, Nachhaltigkeit und Klimaschutz in das Zentrum des Handelns rückt, nicht zu bedeutenden Änderungen bei der Verkehrsmittelwahl (BMDV 2022). Nach einem kurzen Einbruch aufgrund der COVID 19-Pandemie haben sich die Verkehrszahlen binnen weniger Monate wieder auf das vor-Krisen-Niveau erholt. Es ist dabei sogar ein tendenzieller Rückgang bei den Nutzungszahlen des ÖPNV zulasten des PKW-Verkehrs zu beobachten. Zwar steigt im

urbanen Raum der Anteil der mit dem Fahrrad zurückgelegten Wegstrecken, insgesamt bleibt das Auto jedoch das dominierende Verkehrsmittel. Das besonders im urbanen Raum häufige Lippenbekenntnis zu einer emissionsärmeren Mobilität findet nur begrenzten Eingang in das tägliche Handeln. Insbesondere in ländlichen Gebieten scheitern politisch motivierte Versuche, den PKW-Anteil bei der Verkehrsmittelwahl zu reduzieren, häufig an einem mangelhaften Angebot oder gar einem kompletten Fehlen eines öffentlichen Nahverkehrs.

Die potenziellen Maßnahmen zur Verbesserung des Verkehrsflusses lassen sich grundsätzlich in kurzfristig, mittelfristig und langfristig umsetzbare Maßnahmen unterteilen. Bei Projekten mit einem weiten zeitlichen Horizont rücken neben städteplanerischen Maßnahmen zunehmend auch die Themenfelder Automatisierung und Vernetzung des Verkehrs in den Fokus. Haben autonom fahrende Fahrzeuge und Fahrzeuge mit entsprechender Ausstattung zur V2X-Kommunikation einen gewissen Durchdringungsanteil an der Fahrzeugflotte erreicht, bietet sich hier die Möglichkeit, Fahrzeuge mit geringeren Abständen und „intelligenter“ fahren zu lassen. Zudem bieten breit angelegte Pooling- und Sharing-Konzepte Ansätze zu einer optimierten Ausnutzung des Streckennetzes. Speziell den Maßnahmen der Digitalisierung wird künftig ein großes Potenzial zugestanden und sie sind Teil einer breit angelegten Forschung weltweit. Die Techniken haben das Potenzial disruptiv zu völlig neuen Verkehrs- und Mobilitätskonzepten zu führen, sind allerdings im Jahr 2023 noch weit von der Alltagstauglichkeit entfernt. Mittelfristig besteht die Möglichkeit durch gezielte Engstellenbeseitigung oder durch eine Stärkung des ÖPNV eine Entspannung im Verkehrsablauf zu erreichen. Hier wurden in den vergangenen Jahren bereits einige Verbesserungen erreicht, sodass hier nur noch überschaubare Reserven im System vorhanden sind. Kurzfristig bieten verkehrssteuernde Maßnahmen, beispielsweise aus dem Umfeld der Managed Lanes, noch größere Möglichkeiten, um besonders lokal Verbesserungen zu erzielen.

Zentrale Aufgabe der nächsten Jahre wird es daher sein, die steigenden Verkehrsströme im bestehenden Streckennetz zu koordinieren. Dabei bieten sich verschiedene Handlungsfelder. Zum einen liegt der Besetzungsgrad, insbesondere im Berufsverkehr sowie bei dienstlichen Fahrten, mit einem Wert von 1,1 bzw. 1,2 Personen/Kfz (Forschungs-Informationen-System 2023) deutlich unter dem eines Leistungsoptimums für den Personenfluss. Durch eine Erhöhung des Besetzungsgrads der einzelnen Fahrzeuge könnte die Leichtigkeit des Verkehrs substanziell erhöht werden. Daneben kommt es speziell im Umfeld der Metropolregionen zu einer Überlagerung und einem daraus folgenden Nutzungskonflikt zwischen Transitverkehr einerseits und Quell- /Zielverkehr andererseits. Hinzu kommen darüber hinaus noch stetig wachsende Zahlen des Güter- und Lieferverkehrs. Auch hier ist in den nächsten Jahren mit einem weiteren Wachstum der Verkehrsmengen zu rechnen. Durch eine Entflechtung sei es räumlicher oder zeitlicher Art, wären deutliche Leistungssteigerungen im System möglich. Mittels einer, gegebenenfalls auch dynamischen, verkehrsdichteabhängigen Bepreisung von Strecken oder Fahrzeugtypen kann ein weiterer lenkender Einfluss auf die Verkehrsströme sowie die Fahrzeugflotte genommen werden. Einen wesentlichen Beitrag zur Bewältigung dieser Aufgaben können sogenannte Managed Lanes Systeme leisten. Im Rahmen dieser

Systeme werden einzelne Fahrstreifen, ganze Straßen oder sogar komplette Quartiere der unbeschränkten Nutzung durch die Verkehrsteilnehmer entzogen und nur für bestimmte Nutzer (ÖV-Fahrzeuge, Fahrgemeinschaften) und/oder Antriebsarten (emissionsarme /-freie Fahrzeuge) freigegeben oder mit Gebühren belegt.

Im Rahmen dieser Dissertation werden zunächst die unterschiedlichen Arten von Managed Lane Systemen vorgestellt und ihre Umsetzungsperspektiven in Deutschland beleuchtet. Anschließend werden für die bislang nicht verwendeten HOT-Lanes (High-Occupancy-Toll-Lanes, also Fahrstreifen, auf denen Fahrgemeinschaften kostenlos fahren dürfen und freie Kapazitäten gegen Bezahlung von Alleinfahrern genutzt werden dürfen) die Potenziale untersucht und geprüft, welche Folgen für das Verkehrssystem daraus erwachsen.

1.2 Motivation

Steigende Verkehrszahlen bei einer stagnierenden Streckenkapazität führen in Deutschland, aber auch weltweit zu Problemen im Verkehrsablauf. Da auf absehbare Zeit nicht mit substantiellen Ausbau- und Neubaumaßnahmen gerechnet werden kann, muss der bestehende Straßenraum effizienter genutzt werden, um einen möglichst sicheren und leichten Verkehrsfluss zu gewährleisten. Hier bieten sich insbesondere Maßnahmen aus dem Themenfeld der Managed Lanes an. Deutschland nutzt hier bereits einige Techniken, etwa die temporäre Seitenstreifenfreigabe (TSF), dynamische Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) oder in untergeordnetem Maß auch die Zuflussdosierung. Bislang nicht zum Einsatz kommen in Deutschland aktuell HOT-Lanes, obwohl diese im Ausland bereits mehrfach erfolgreich umgesetzt werden konnten.

Derzeit gibt es wenig Forschung, die sich mit möglichen HOT-Lanes in Deutschland oder sogar dem benachbarten Ausland beschäftigt. Beispiele hier sind (Leonhardt et al. 2012), die jedoch den Fokus auf eine israelische Autobahn, die Kvisch 1 in Tel Aviv, legen und (Weyland et al. 2019), bei denen der Fokus verstärkt auf HOV-Lanes liegt.

Was bisher fehlt, ist ein Ansatz zur Abschätzung der Auswirkungen und Potenziale von HOT-Lanes in Deutschland. Dies beginnt mit der Nachfrage und dem Verkehrsmittelwahlverhalten von Pendlern, wenn ihnen ermöglicht wird, Vorteile durch einen Sonderfahrstreifen zu erlangen. Hier muss ein neuer Ansatz zur Nachfrageschätzung entwickelt werden, der die geänderten Rahmenbedingungen durch mögliche Kosten und Reisezeitgewinne berücksichtigt.

Daneben gilt es auch die Auswirkungen auf den regulären Verkehr zu untersuchen und Rahmenbedingungen und Einsatzgrenzen für HOT-Lanes zu finden, um Ansätze für eine Realisierung auf einem realen Streckenzug zu definieren.

Neben den Herausforderungen, die aktuellen Engpässe im deutschen Verkehrssystem zu reduzieren, bieten Managed Lanes auch das Potenzial, durch innovative Ansätze die Weichen

für eine nachhaltige und zukunftsfähige Mobilität zu stellen. Die Analyse der HOT-Lanes in Deutschland soll nicht nur einen Beitrag zur Lösung akuter Verkehrsprobleme leisten, sondern auch einen Beitrag dazu liefern, wie zukünftige Mobilitätskonzepte gestaltet werden können, um den Anforderungen einer wachsenden und sich verändernden Gesellschaft gerecht zu werden. Diese Dissertation strebt somit an, einen konstruktiven Beitrag zur Diskussion über die Mobilität der Zukunft in Deutschland zu leisten und innovative Wege aufzuzeigen, wie der Verkehr effizienter, nachhaltiger und nutzerfreundlicher gestaltet werden kann. Dabei wird hier bewusst ein System mit kurzfristiger Umsetzungsperspektive, aber geringerer globalen Wirkmächtigkeit gewählt. Für eine zukunftsgerichtete Mobilitätsentwicklung ist es wichtig, neben den Herausforderungen auch die Chancen zu erkennen und mit auch mit kleineren Schritten, aber dafür stetig, die vorhandenen Verkehrssysteme zu verbessern.

1.3 Forschungsfragen

In Deutschland kommen bereits einige Systeme aus dem Wirkungskreis der Managed Lanes zum Einsatz, etwa dynamische Verkehrsbeeinflussungsanlagen oder die temporäre Seitenstreifenfreigabe. Wie im Folgenden noch herausgearbeitet werden wird, haben von den hierzulande bislang nicht verwendeten Managed Lane Systemen, insbesondere HOT-Lanes größere Potenziale. Da HOT-Lanes bislang noch nicht in Deutschland oder dem nahen Ausland zur Anwendung kommen, fehlen bislang Erfahrungswerte zu den Auswirkungen einer solchen Maßnahme. Es ergeben sich damit folgende Forschungsfragen, die in drei größere Themenblöcke zusammengefasst werden können und im Rahmen dieser Dissertation behandelt werden sollen.

1. Welche Potenziale und Einflussfaktoren gibt es für die Nutzung von HOT-Lanes in Deutschland?

Die zentrale Frage, wenn es um die Einführung einer neuen Technologie geht ist, welche Potenziale kann das neue System entfalten und welche Einflussfaktoren wirken auf den Projekterfolg. Auf die HOT-Lane bezogen stellt sich die Frage, wie hoch das Interesse der deutschen Autofahrer an der Nutzung einer HOT-Lane ist und welche Zusammensetzung der Nutzkreis haben wird. Dafür sind insbesondere die Individualinteressen der Stakeholder relevant und wie diese beeinflusst werden. Da die Nutzung von Fernstraßen in Deutschland derzeit für den PKW-Verkehr gebührenfrei und nur für den Schwerverkehr mit Mautgebühren verbunden ist, ist die Frage zentral, ob es eine grundsätzliche Bereitschaft gibt, für Privilegien im Verkehr zu bezahlen. Dabei wird vermutlich eine große Rolle spielen, wie stark ausgeprägt und wie stabil die Reisezeitgewinne sind, die vom jeweiligen Verkehrsteilnehmer erreicht werden können. Zu den zu untersuchenden Einflussfaktoren zählen die sozio-ökonomischen Faktoren, die wirtschaftliche Komponente und die klassischen verkehrstechnischen Einflussgrößen, wie Reisezeit, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit. Die Einflussgröße wird dabei jeweils unterschiedlich ausgeprägt sein.

Grundlage für die Potenziale können Erfahrungen aus anderen Ländern sein, die bereits HOT-Lanes als Baustein ihrer Mobilitätsplanung verwenden, zentral sind aber die Erkenntnisse, die aus Umfragen und Simulationen im deutschen Streckennetz gewonnen werden.

Die Frage der Potenziale von HOT-Lanes in Deutschland ist eng mit der im Anschluss formulierten Forschungsfrage 2 verknüpft, wenn es um die einzelnen Effekte einer HOT-Lane geht. Primär zielt die Frage der Potenziale auf einen möglichen Projekterfolg und das Maß möglicher Nutzer. Dies geht aber selbstverständlich mit Verkehrsverlagerungen und unterschiedlichen Push- und Pull-Faktoren einher.

2. Welche Effekte ergeben sich aus der Implementierung von HOT-Lanes in Deutschland?

Für die praktische Anwendung einer HOT-Lane ist es von maßgebender Bedeutung, mit welchen Auswirkungen durch die neue Managed Lane zu rechnen ist. Dabei gehen die Effekte deutlich über die klassischen verkehrstechnischen Themen hinaus und umfassen auch Umweltwirkungen oder soziale Aspekte. Für das Themenfeld der Verkehrstechnik sind zunächst die Verkehrsauswirkungen relevant. Da in Deutschland eine HOT-Lane vermutlich auf einem bestehenden Fahrstreifen zulasten der regulären Fahrstreifen umgesetzt werden würde, ist von deutlichen Veränderungen im Verkehrsablauf auszugehen. Diese werden eine Entwicklung über die Zeit erfahren. Zunächst ist von vermehrten Stauungen und Einbußen bei der Leichtigkeit des Verkehrs auszugehen, einhergehend mit Problem bei der Sicherheit des Verkehrs, welche bei dichterem Verkehr auftreten. Wenn für die Verkehrsteilnehmer über die Zeit, das Preisregime und die zu erwartenden Fahrzeiten greifbarer werden, ist ein gewisser Wechsel in der Verkehrsmittelwahl realistisch, wenn sich die Vorteile der alternativen Fahrgemeinschaften und ÖPNV deutlich zeigen und auch die Kosten einer Fahrt auf der HOT-Lane in einem Gleichgewicht sind. Hierzu ist es wichtig, dass sich das Optimum der HOT-Lane einstellt, welches dann eintritt, wenn die erwarteten Reisezeiten mit den realen Reisezeiten übereinstimmen. Hier wird die zentrale Aufgabe sein zu prüfen, ob und wie viel schneller oder langsamer welcher Anteil der Verkehrsteilnehmer im Umgriff der Managed Lane sein wird. Daraus lassen sich auch Rückschlüsse auf die zukünftige Verkehrsqualität der Autobahn in diesem Streckenabschnitt ziehen.

Durch die geänderten Verkehrsflüsse einer HOT-Lane, wird es vermutlich zu Änderungen bei den Umweltwirkungen kommen. Die unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofile auf den verschiedenen Fahrstreifen sowie die geänderten Verkehrsdichten im Vergleich zum Ausgangszustand vor Implementierung einer HOT-Lane dürften in der Praxis zu unterschiedlichen Emissionen führen. Diese werden voraussichtlich für die einzelnen Fahrstreifen und bei variierenden Rahmenbedingungen unterschiedlich sein. Die Modellierung von Emissionen und ihre Ausbreitungsmodelle sind sehr komplex und kein zentraler Bestandteil dieser Arbeit. Es wird daher auf eine grobe Abschätzung der Emissionen mittels Standardverfahren zurückgegriffen, die aber für erste Aussagen zum Themenkomplex Umweltwirkungen ausreichend sein sollten.

Eine zusätzliche Kostenkomponente hat Auswirkungen auf die sozio-ökonomischen Aspekte der Mobilität. Es stellt sich die Frage, wer sich die Nutzung eines bepreisten Fahrstreifens leisten kann und möchte. Für die Akzeptanz der HOT-Lane ist es wichtig, wie in der Bevölkerung die Möglichkeit der kostenlosen Nutzung des Sonderfahrstreifens für Fahrgemeinschaften aufgenommen wird. Für den Projekterfolg wäre eine Wahrnehmung als soziale Ungerechtigkeit fatal. Interessant wird, wie die Wahrnehmung und Nutzung von privilegierten Verkehrsmitteln Eingang in die Verkehrsmittelwahl findet und ob hier der soziale Status eine Rolle spielt.

3. Welche Rahmenbedingungen müssen geschaffen werden, um den Einsatz von HOT-Lanes in Deutschland zu ermöglichen?

Die Frage der erforderlichen Rahmenbedingungen zur Implementierung einer HOT-Lane umfasst alle Belange, die mit einer HOT-Lane in Kontakt stehen. Dies beginnt bei den rechtlichen Grundlagen. Hier ist zu prüfen, ob und welche Anpassungen an Gesetzen und Verordnungen vorgenommen werden müssen, um überhaupt eine theoretische Umsetzungschance zu erreichen. Daneben müssen die Anforderungen aus Politik und Verwaltung an eine HOT-Lane eingeordnet werden.

Bereits zu Beginn dieser Arbeit lässt sich mit großer Sicherheit sagen, dass Managed Lanes und die HOT-Lanes im Besonderen kein Allheilmittel für eine problemfreie zukunftsfähige Mobilität, sondern lediglich ein Baustein in einem vielschichtigen komplexen Maßnahmenpaket sein werden. Dafür müssen die Stärken und Schwächen der HOT-Lanes klar benannt und mit den in Forschungsfrage 2 erarbeiteten Effekten zu einer belastbaren Prognose gebracht werden. Hier spielen auch soziale Fragestellungen eine wichtige Rolle, um zu verhindern, dass die Akzeptanz aufgrund einseitiger Benachteiligungen bestimmter Nutzergruppen leidet. Hierfür sind auch wirtschaftliche Aspekte, wenn es um die konkrete Preisgestaltung geht, von zentraler Bedeutung. Wenn es zu konkreten Projekten kommt, ist davon auszugehen, dass HOT-Lanes nicht bei allen Straßenquerschnitten und Verkehrsmengen ihre volle Wirkmächtigkeit entfalten können. Hier sind die Anwendungsgrenzen einer HOT-Lane relevant und ein möglichst optimaler Wirkungsbereich zu definieren.

1.4 Methodik und Aufbau

Um die drei genannten Forschungsfragen zu beantworten, werden vier Hauptarbeitspakete identifiziert, die sich auch in der Kapitelstruktur dieser Arbeit niederschlagen. Der Aufbau der Arbeit mit den wesentlichen Schritten ist in Abbildung 1 dargestellt.

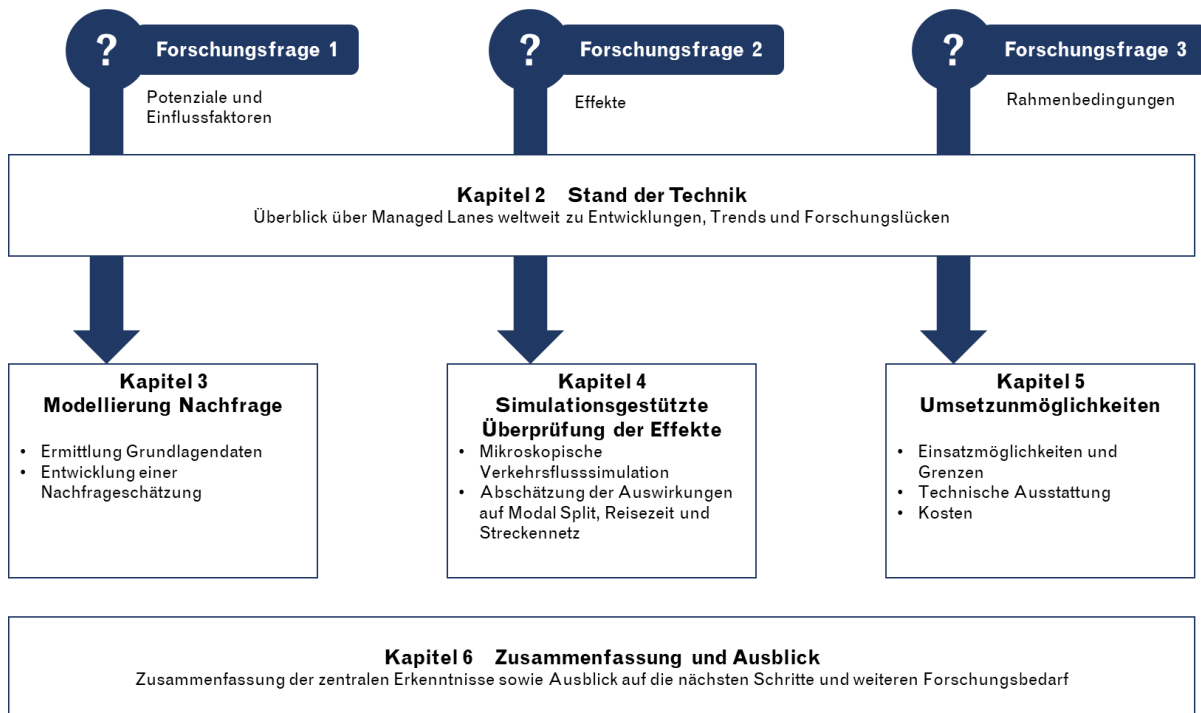


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

Grundlage der Arbeit ist eine umfangreiche Literaturrecherche und Sammlung von Best Practice Beispielen. Ziel dabei ist, den Begriff der Managed Lanes zu fassen und einen Überblick über den internationalen Stand der Technik zu erhalten. Hierzu werden unter anderem Verkehrsbehörden weltweit zur aktuellen Umsetzung von Managed Lane Konzepten angefragt und öffentlich einsehbare Datenbanken ausgewertet. Die Ergebnisse werden visualisiert und eingeordnet. Durch den globalen Realisierungsgrad lassen sich Rückschlüsse auf Potenziale von verschiedenen Arten von Managed Lanes weltweit ziehen und welche Rahmenbedingungen, insbesondere für die im späteren Verlauf der Arbeit vertieft betrachteten HOT-Lanes, für die Implementierung herrschen müssen.

Im zweiten Schritt wird anhand einer Umfrage die Einstellung deutscher Pendler zu Themen wie Fahrgemeinschaften, kostenpflichtige Sonderfahrstreifen sowie zur allgemeinen Mobilität auf dem Arbeitsweg abgefragt. Die Umfrage muss einen möglichst repräsentativen Querschnitt der Pendler abbilden. Sie wird nach der Stated Preference Methode aufgebaut, da sich die Fragen auf ein aktuell hypothetisches Konstrukt beziehen. Die Auswertung erfolgt zunächst deskriptiv, anschließend werden ausgewählte Aussagen tiefergehend betrachtet und beispielsweise mittels ANOVA-Matrizen und weiteren statistischen Verfahren ausgewertet. Dies leitet zum dritten Schritt über.

Die Ermittlung der Nachfrage erfolgt auf Grundlage der Erkenntnisse der Umfrage. Zunächst werden anhand einer Strukturgleichungsmodellierung die Daten auf ihre Abhängigkeiten hin untersucht. Daraus werden die verfügbaren und maßgebenden Eingangsvariablen qualitativ und quantitativ ermittelt. Im Anschluss daran werden mittels multinominaler logistischer Regression und eines Optimierungsverfahrens ein agentenbasierter und ein gebietsbasierter

Ansatz entwickelt, die für bestimmte Rahmenbedingungen den Modal Split prognostizieren. Die beiden Ansätze werden mittels einer Sensitivitätsanalyse auf die Einflussstärke der Eingangsparameter untersucht.

Im vierten Schritt werden schließlich die Auswirkungen einer HOT-Lane mittels einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation untersucht. Um eine möglichst allgemeingültige Aussagekraft der Ergebnisse zu gewährleisten, wird als Simulationsumfeld ein synthetischer Streckenzug auf Grundlage des HBS 2015 gewählt. Es kommen Szenarien unter Verwendung unterschiedlicher Kostensätze und Verkehrsmengen zum Einsatz. Die so gewonnenen Erkenntnisse werden intensiv analysiert und diskutiert.

Nach Abschluss der vorab genannten vier Arbeitspakete werden die Ergebnisse nochmals geordnet und zusammengefasst. Es werden Empfehlungen für die Anwendung von HOT-Lanes in Deutschland erarbeitet und ein Ausblick auf mögliche Zukunftsszenarien gegeben.

2. Sonderfahrstreifen als Werkzeug der Verkehrsflussoptimierung

Sonderfahrstreifen sind ein wesentliches Werkzeug in der Verkehrsflussoptimierung, das darauf abzielt, den Verkehr effizienter zu gestalten, Engpässe zu reduzieren und die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Die konkreten Ziele und Rahmenbedingungen führen dazu, dass bestimmte Systeme für konkrete Projekte geeigneter sind als andere. Im Folgenden werden die einzelnen Arten von Managed Lanes genauer vorgestellt und in den Gesamtkontext eingeordnet.

2.1 Grundlagen von Managed Lanes

Der Begriff Managed Lanes ist derzeit nicht eindeutig und abschließend definiert, weder in den USA noch in Europa. Ebenso gibt es im Deutschen keine einheitliche Übersetzung des englischen Begriffs Managed Lane, am nächsten kommt vermutlich der Begriff des Sonderfahrstreifens, der in dieser Arbeit im Folgenden auch synonym zu Managed Lanes verwendet wird.

In der Vergangenheit gab es eine Reihe von Versuchen Managed Lanes zu definieren, wovon sich jedoch keine Definition dauerhaft durchsetzen konnte. Aufgrund der Dynamik in den Themengebieten der Verkehrstechnik sowie dem Verkehrsmanagement, ist auch in Zukunft mit neuen Entwicklungen zu rechnen, welche eine Änderung oder Erweiterung bestehender Definitionen erforderlich machen werden.

Im Folgenden werden einige der am weitest verbreitetsten Definitionen vorgestellt. Ein bereits etwas älterer Ansatz zur Definition von Managed Lanes, der allerdings immer noch Gültigkeit hat, stammt vom Texas Transportation Institute aus dem Jahr 1998 (Texas Transportation Institute et al. 1998). Gegen Ende des letzten Jahrhunderts kam es zu einer Reihe an Innovationen im Bereich der Verkehrstechnik, die eine stärkere Differenzierung und Klassifizierung von verkehrslenkenden Maßnahmen notwendig machte.

A lane(s) or roadway dedicated to the exclusive use of specific high-occupancy vehicles, including buses, carpools, vanpools or a combination thereof, for at least a portion of the day.

Rund ein Jahrzehnt später veröffentlichte die amerikanische Federal Highway Administration 2008 folgenden Ansatz zur Definition von Managed Lanes (Federal Highway Administration 2008):

"Managed lanes" are defined as highway facilities or a set of lanes where operational strategies are proactively implemented and managed in response to changing conditions.

In der Zwischenzeit waren Digitalisierung und die Automatisierung von Prozessen deutlich vorangeschritten und hatten weitere Anwendungsfelder für Managed Lanes geöffnet.

Das US Department of Transportation setzte mit seiner im Jahr 2004 veröffentlichten Definition von Managed Lanes (Collier und Goodin 2004) einen anderen Schwerpunkt:

“Managed Lanes” are defined as a limited number of lanes set aside within an expressway cross-section where multiple operational strategies are utilized, and actively adjusted as needed, for the purpose of achieving pre-defined performance objectives.

Der Ansatz von Perez, Fuhs et al. aus dem Jahr 2012 ist allgemeiner gefasst (Benjamin G. Perez, Charles Fuhs, et. al 2012) und versucht so auch Raum für künftige Entwicklungen zu lassen.

Managed lanes are designated lanes or roadways within highway rights-of-way where the flow of traffic is managed by restricting vehicle eligibility, limiting facility access, or and in some cases collecting variably priced tolls.

Der bisher umfassendste Ansatz zur Definition von Managed Lanes stammt von Fitzpatrick et al. aus den 2016 veröffentlichten „Guidlines for Implementing Managed Lanes“ (Fitzpatrick et al. 2016).

Managed lanes are dedicated lanes or roadways implemented in congested freeway corridors that are actively controlled through a variety of strategies to limit flow rates and thereby preserve an acceptable level of service. By taking such measures, managed lanes generate significant travel benefits, including time savings and improved reliability and operational efficiency to the roadway system. Such lanes can be added either along with new roadway facilities or as modifications to existing facilities; they should not typically be converted from existing general-purpose lanes. Managed lanes can be considered for specific bottlenecks, as corridor treatments, or as networks or systems in a metropolitan region.

Allen oben genannten Definitionen ist gemein, dass sie ihren Fokus auf Schnellstraßen, insbesondere Autobahnen, im Außerortsbereich haben. Diese Einordnung ist aus europäischer Sicht durchaus kritisch zu hinterfragen, da viele Managed Lanes auch erhebliche Potenziale im überörtlichen Straßennetz außerhalb der Autobahnen sowie im kommunalen Straßennetz haben.

Grundsätzlich fallen alle Fahrstreifen unter die Definition der Manage Lanes, welche nicht dauerhaft der unbegrenzten Nutzung durch den allgemeinen öffentlichen Verkehr zur Verfügung stehen. Dabei ist es unerheblich, ob die Beschränkung des Verkehrs zeitlich, räumlich und/oder nutzergruppenbezogen ist, oder ob externe Fahrwiderstände,

beispielsweise in Form von Gebühren oder Restriktionen, wie zusätzlichen Geschwindigkeitsbeschränkungen, auferlegt werden.

Generell können Maßnahmen, die derzeit dem erweiterten Themenfeld der Sonderfahrstreifen zugeordnet werden, in vier Kategorien eingeordnet werden.

- Maut / Bepreisung (englisch „Pricing“)
- Reglementierung von Nutzergruppen (englisch „Eligibility“)
- Räumliche und zeitliche Zuflussbeschränkungen (englisch „Access control“)
- Dynamische Verkehrsleittechnik (englisch „Traffic management technology“)

Dabei können, je nach Komplexität der Maßnahme, auch verschiedene Elemente der gleichen oder unterschiedlichen Kategorien miteinander kombiniert werden. Eine beispielhafte Auswahl an Managed Lane Systemen wird in Kapitel 2.3 Arten von Managed Lanes vorgestellt.

In das Themenfeld Maut/Bepreisung fallen sämtliche Maßnahmen, die monetäre Widerstände im Streckennetz erzeugen. Hierzu zählen Nutzungsgebühren oder Durchfahrtgebühren für bestimmte Strecken und Gebiete, beispielsweise als City-Maut, wie sie etwa in London erhoben wird, oder Mautstrecken im Fernstraßennetz zur Lenkung von Verkehrsströmen. Häufig sind solche Nutzungsentgelte an bestimmte Fahrzeuggruppen oder Besetzungsgrade gekoppelt und können vermieden werden, indem beispielsweise emissionsfreie Fahrzeuge genutzt werden oder der Besetzungsgrad im Fahrzeug über einem Mindestwert liegt. Zentrales Unterscheidungsmerkmal zwischen Managed Lanes mit Schwerpunkt auf finanziellen Wirkmechanismen und generellen Nutzungsgebühren ist, dass bei Managed Lanes die Höhe und lokale Festsetzung der Bepreisung stets einen verkehrssteuernden Hintergrund haben muss. Es ist das Ziel das Verkehrsaufkommen zu reduzieren, zu optimieren oder auf geeignetere Strecken zu verlagern. Demgegenüber dient eine generelle Streckennutzungsgebühr der Refinanzierung von Herstellungskosten, Unterhalt und Betrieb sowie in Abhängigkeit vom Betreibermodell der Finanzierung von Ausbaumaßnahmen und der Erwirtschaftung von Gewinnen.

Im Bereich der Reglementierung von Nutzergruppen werden alle Maßnahmen zusammengefasst, bei denen nicht mehr alle Verkehrsteilnehmer Zugang zu einem Fahrstreifen oder Streckenabschnitt haben. Das in Deutschland bekannteste und vermutlich am weitesten verbreitete Beispiel sind sogenannte Busspuren, welche ausschließlich von Fahrzeugen des ÖPNVs sowie Rettungs- und Einsatzfahrzeugen befahren werden dürfen. Überdies können Beschränkungen auch den Besetzungsgrad von Fahrzeugen, die Fahrzeugklasse oder das Fahrtziel, beispielsweise bei Durchgangsverkehr, betreffen.

Der Begriff räumliche und zeitliche Zuflussbeschränkungen birgt ohne Erläuterung die Gefahr einer Fehlinterpretation. In diese Kategorie fallen Maßnahmen, wie Wechselverkehrsspuren, welche im Tagesverlauf, je nach maßgebender Verkehrsflussrichtung, in unterschiedlichen Richtungen befahren werden oder lokale Erschließungsspuren, welche für die Abwicklung kleinräumiger Verkehre freigehalten werden. Die Ziele von räumlichen und zeitlichen

Zuflussbeschränkungen sind die Homogenisierung von Verkehrsströmen, beispielsweise indem Verflechtungsvorgänge reduziert werden, die Kapazitätssteigerung sowie Verhinderung von Überlastungen.

Die neuste Gruppe der Managed Lanes ist die dynamische Verkehrsleittechnik. Hierunter fallen Maßnahmen, welche mittels dynamischer Beschilderung in Abhängigkeit von etwa Verkehrsfluss, Hindernissen, wie Unfällen, oder Witterungsbedingungen steuernd in den Verkehr eingreifen. Dabei kann das Eingreifen von angepassten Geschwindigkeitsbeschränkungen über Überholverbote bis hin zu Warnungen und Informationen gehen. Die Grenze zu anderen Maßnahmen der Managed Lanes ist dabei fließend. Insbesondere die fortschreitende Digitalisierung im Verkehrswesen verwischt eine klare Abgrenzung zwischen den einzelnen Kategorien von Managed Lanes immer weiter.

Im Jahr 2004 wurde von Collier und Goodin (Collier und Goodin 2004) eine systematische Einordnung verschiedener Managed Lane Systeme vorgenommen, die von Fitzpatrick et al. (Fitzpatrick et al. 2016) im Jahr 2016 um verschiedene neuartige Verkehrsmanagement-Maßnahmen erweitert wurde. Abbildung 2 zeigt das Schema, welches die überwiegende derzeitige Forschungsmeinung abbildet. Auf der y-Achse werden die unterschiedlichen Handlungsfelder der Managed Lanes beschrieben, auf der x-Achse wird nach rechts aufsteigend der Grad der Komplexität einer Maßnahme dargestellt. Mit den unterschiedlichen Farben werden „Maßnahmen-Familien“ gekennzeichnet, wobei diese Unterteilung umstritten ist, da beispielsweise HOV-Lanes, also Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge, enger mit HOT-Lanes, Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge sowie zahlende Straßennutzer, verbunden sind, als beispielsweise mit LKW-Fahrstreifen. Grundsätzlich ist die Abbildung jedoch sehr gut geeignet, um die Zusammenhänge und Komplexitäten eines Sonderfahrstreifens aufzuzeigen.

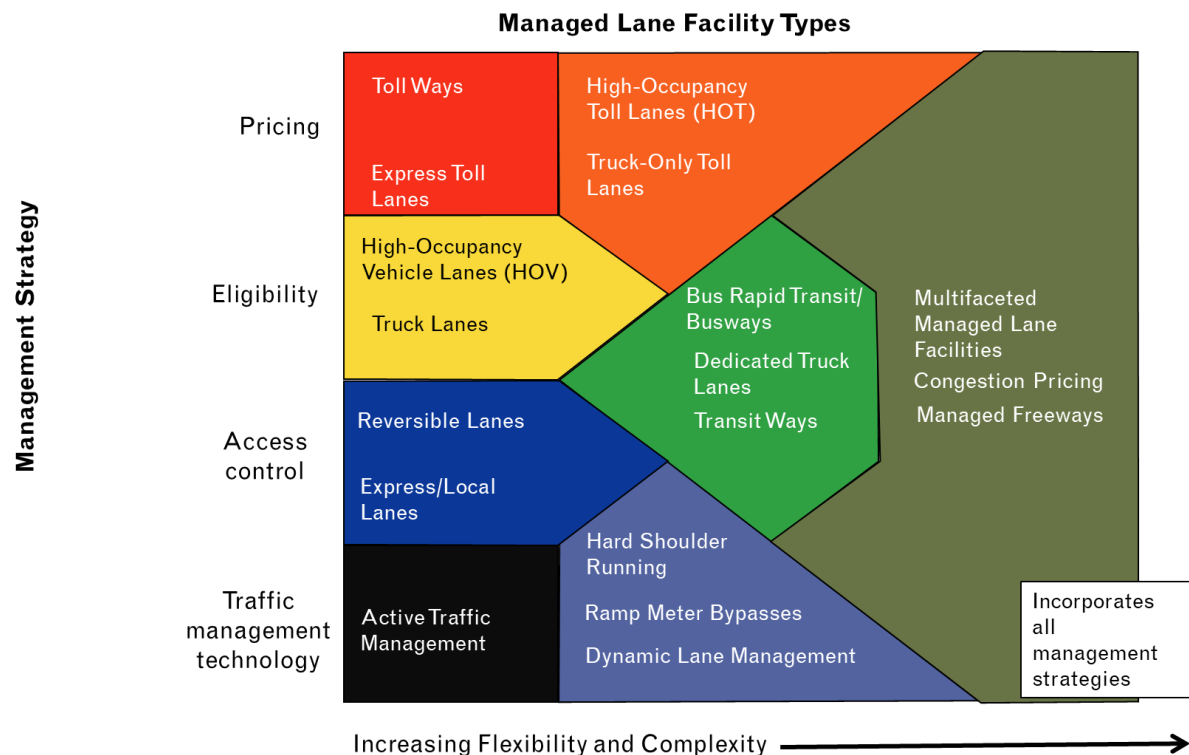


Abbildung 2: Arten von Managed Lanes nach (Collier und Goodin 2004) und (Fitzpatrick et al. 2016)

2.2 Entwicklung der Managed Lanes

Betrachtet man rein die verwendeten Methoden, ist die Geschichte der Managed Lanes annähernd so alt wie die Geschichte des Wegebau. Allerdings war die Zielstellung der damaligen Verkehrssteuerung eine andere. Bereits aus den Jahren um 3.000 vor Christus gibt es aus den Hochkulturen Ägyptens sowie des Orients Nachweise über Straßennutzungsgebühren und Mautstellen (Zoll- & Frachtzentrale Rhein-Main 2022). Diese dienten in der damaligen Zeit weniger der Verkehrsvermeidung und –verlagerung als der Generierung von Einnahmen für den Staatshaushalt. Dabei bot das Reisen auf offiziellen Straßen einen gewissen Schutz gegenüber Raubüberfällen und durch erste befestigte Wege ein schnelleres Fortkommen, teilweise mit rudimentärer Infrastruktur in Form von Verpflegungsmöglichkeiten. Im römischen Reich wurde mit einem ersten professionellen Wegenetz, den sogenannten Römerstraßen, eine fortschrittliche Infrastruktur geschaffen, für welche ebenfalls Maut bezahlt werden musste (Klee 2010). Zwar gab es auch die Möglichkeit abseits von offiziellen Straßen und Wegen zu reisen und damit Kosten zu sparen, allerdings war dies mit Einschränkungen bezüglich Sicherheit und Reisequalität verbunden. Eine Weiterentwicklung des Systems erfolgte ab etwa dem 12. Jahrhundert, als für den Transport bestimmter Warengruppen ein sogenannter „Straßenzwang“ auferlegt wurde. Dieser besagte, dass bestimmte Waren nur auf festgelegten Strecken transportiert werden dürfen, für die eine Nutzungsgebühr zu entrichten war. Diese Streckenzüge wurden von den jeweiligen Machthabern verstärkt geschützt, letztlich diente die Maßnahme jedoch vornehmlich der

Generierung von zusätzlichen Einnahmen (Brandstätter 2007). So kam es im Mittelalter regelmäßig zu Konflikten zwischen rivalisierenden Machthabern, wie Fürsten, Bischöfen oder Königen, um die Kontrolle über einträgliche Handelsstrecken, in deren Folge regelmäßig Brücken demontiert oder abgebrannt und Straßen sabotiert wurden. Erst mit dem Ende der Kleinstaaterei und der Industrialisierung nahm diese Art der „Verkehrssteuerung“ ein Ende.

Betrachtet man den gesamten Themenkomplex der Managed Lanes, so ist deren Ursprung in der Mitte des 20. Jahrhunderts zu verorten. Mit dem verstärkten Aufkommen des Automobils ab etwa den 1930er-Jahren und insbesondere nach dem Zweiten Weltkrieg stieg die Zahl der zurückgelegten Fahrzeugkilometer steil und stetig an. Beispielhaft für die USA zeigt Abbildung 3 die Entwicklung von zurückgelegten Kilometern sowie der Entwicklung des Streckennetzes. Auch wenn die konkreten Zahlen abweichen, ist diese Entwicklung in allen westlichen Staaten in vergleichbarer Form zu beobachten. Betrachtet man die Grafik, erkennt man, dass das Streckennetz der USA zwischen 1950 und 2016 um 25 % erweitert wurde. Demgegenüber nahm der Verkehr jedoch um rund 700 % zu. Dies führte etwa ab den 1960er-Jahren im Umfeld der Metropolen zu spürbaren Verkehrsbehinderungen.

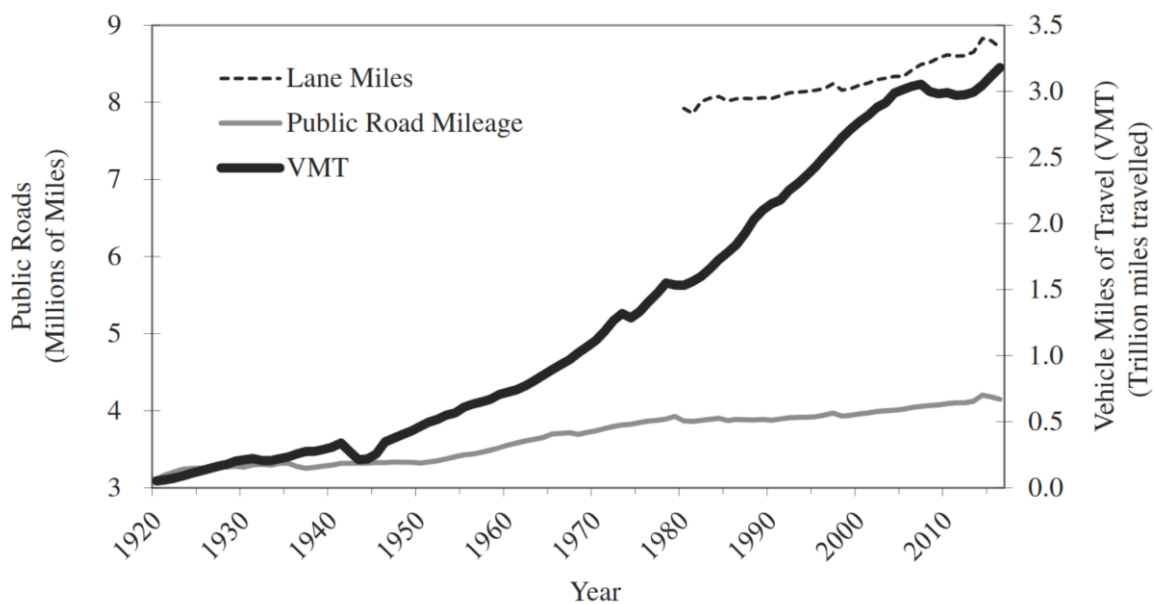


Abbildung 3: Entwicklung Streckenkilometer USA (Frey 2018)

Betrachtet man die Entwicklung in Abbildung 3, wird schnell deutlich, wieso Managed Lanes spätestens ab Ende der 1970er-Jahre eine zunehmende Bedeutung im Streckennetz einnehmen. Die Entkopplung der Zuwachsraten der Verkehrsmengen und der Ausbau- sowie Erweiterungsmaßnahmen im Straßennetz sorgt dafür, dass der vorhandene Straßenraum an seine Kapazitätsgrenzen gerät und effizienter genutzt werden muss. Ähnlich wie bei den Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge, deren Zunahme über die Zeit in Abbildung 4 dargestellt ist, gewinnen alle Arten von Managed Lanes in den vergangenen Jahren stetig an Bedeutung. Aufgrund technischer Neuerungen sowie der Digitalisierung steigt neben der

Anzahl der Projekte auch deren Komplexität, wie die Zunahme von HOT-Lanes im Bereich der HOV-Lanes zeigt.

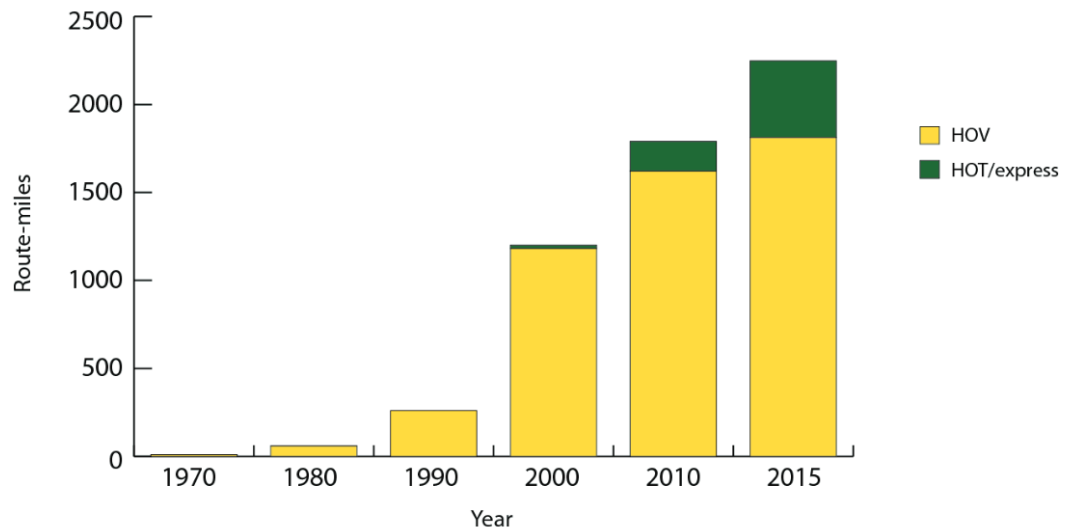


Abbildung 4: Streckenkilometer von Sonderfahrstreifen in den USA (Fitzpatrick et al. 2016)

Die in Abbildung 3 und Abbildung 4 sichtbaren Entwicklungen haben eine Reihe von Ursachen. In den vergangenen Jahren nahm die Zahl der Menschen, die weltweit in Großstädten oder Metropolregionen leben, stetig zu und hat sich seit 1975 mehr als verdoppelt (OECD 2018). Damit gehen allerdings speziell in den Metropolregionen Nutzungskonflikte bezüglich der verfügbaren Flächen einher. Erweiterungen oder Neubauten von Straßen sind räumlich mittlerweile schwierig, da die angrenzende Bebauung häufig bis an den Fahrbahnrand heranreicht. Zusätzliche Emissionen, die zu einem Verlust an Lebensqualität in den angrenzenden Quartieren führen, können im urbanen Umfeld kaum ausgeglichen werden, was vor dem Hintergrund einer weltweit zunehmend verschärften Gesetzgebung in Umweltfragen zu weiteren Problemen führt. Dabei spielen auch gesellschaftliche Veränderungen eine Rolle, in der die Akzeptanz für Infrastrukturprojekte, insbesondere, wenn sie nicht dem eigenen Vorteil dienen, stark rückläufig ist. Zudem fehlen in vielen Ländern Finanzmittel für eine ausreichende Ausstattung der Infrastruktur. Mittelfristig ist bei den vorgenannten Gründen auch keine Trendumkehr zu erwarten, sodass die durch die prosperierenden Städte stetig steigende Verkehrsnachfrage weitestgehend auf dem bestehenden Streckennetz abgewickelt werden muss. Dies macht eine effizientere Nutzung der Kapazitäten unabdingbar, um den Verkehrsfluss aufrechtzuerhalten.

Generell kann die Geschichte der Managed Lanes in drei größere Abschnitte unterteilt werden, welche in Abbildung 5 mit den Farben Braun, Blau und Grün dargestellt sind. Bis in die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts kamen hauptsächlich Wegezölle zum Einsatz, mit dem Zweck Geld zu verdienen. Mit zunehmender Urbanisierung und steigenden Verkehrszahlen kamen ab Mitte des 20. Jahrhunderts verstärkt Systeme zur Verkehrsbeeinflussung zum Einsatz. Ausgangspunkt waren die großen Metropolregionen der USA, welche zum damaligen

Zeitpunkt auch das höchste Verkehrsaufkommen hatten. Wurden zunächst nur freie Kapazitäten mit Wechselverkehrsstreifen genutzt, entwickelten sich nach dem Zweiten Weltkrieg vermehrt Maßnahmen, um den Verkehrsfluss durch Dosierung und höhere Besetzungsgrade auch zu steuern. Mit zunehmendem Einsetzen der Digitalisierung, wurden auch die verkehrssteuernden Maßnahmen angepasst und optimiert. Algorithmen erlauben dabei kurzfristig und flexibel auf das jeweilige Verkehrsgeschehen zu reagieren und aktiv auf mögliche Engpässe zu reagieren.

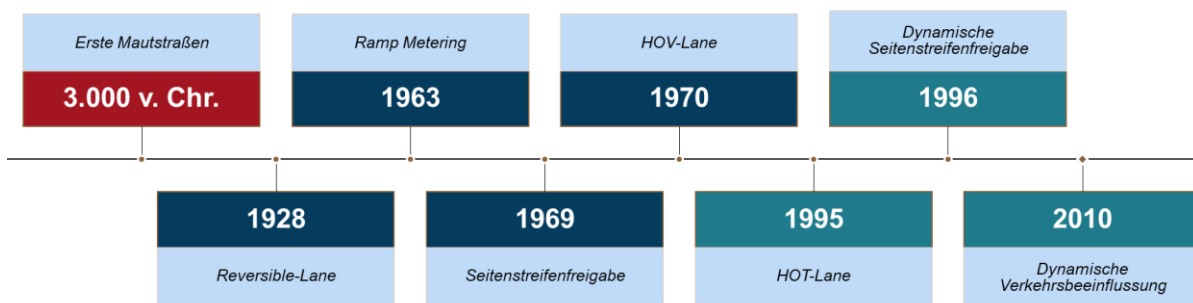


Abbildung 5: Entwicklung mit wichtigsten Meilensteinen der Managed Lanes

2.3 Arten von Managed Lanes

Nachfolgend werden die einzelnen Managed Lane Systeme genauer vorgestellt.

2.3.1 Fahrstreifen für mehrfachbesetzte Fahrzeuge (HOV-Lanes / HOT-Lanes)

Bei Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge, auf Englisch HOV-Lanes (High Occupancy Vehicles) genannt, handelt es sich um Fahrstreifen oder ganze Streckensektionen, welche ausschließlich von Fahrzeugen genutzt werden dürfen, die eine Mindestanzahl an Insassen aufweisen. Je nach erforderlichem Besetzungsgrad werden die Strecken als HOV 2+, falls mindestens zwei Personen im Fahrzeug sein müssen oder HOV 3+ bei mindestens 3 erforderlichen Personen im Fahrzeug bezeichnet. Überdies gibt es insbesondere in den USA regional unterschiedliche Bezeichnungen für HOV-Lanes, unter anderem Diamond Lane, transit lane oder carpool lane (May et al. 2007). Die Einrichtung von HOV-Lanes kann sowohl dauerhaft als auch auf die Spitzenstunden begrenzt erfolgen. Bei einer zeitlich begrenzten Nutzung kommen stellenweise auch Wechselverkehrsstreifen zum Einsatz. In aller Regel werden Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge mit Busspuren kombiniert, welche ebenfalls einen ausreichend hohen Besetzungsgrad aufweisen. Die Beschilderung für HOV-Lanes erfolgt meist mit Elementen der Abbildung 6. Dabei ist stets der erforderliche Besetzungsgrad, in diesem Fall mindestens 2 Fahrzeuginsassen, angegeben und häufig auch das jeweilige grafische Symbol der HOV-Lane, hier die Raute, welche einen Diamanten symbolisieren soll.



Abbildung 6: Beschilderung HOV-Lane (Tantillo et al. 2020)

In Deutschland sollte im Jahr 2020 mit der Novelle der StVO ein Verkehrszeichen für die Einrichtung von Fahrstreifen mit hochbesetzten Fahrzeugen eingeführt werden. Das Verkehrszeichen, zu sehen in Abbildung 7, sollte unter der Bezeichnung Zusatzzeichen 1024-22 in die StVO sowie den Verkehrszeichenkatalog aufgenommen werden (Bundesanstalt für Straßenwesen 2018). Mit dem Scheitern der Novelle der StVO aufgrund eines Formfehlers erlangte das Verkehrszeichen jedoch keine Gültigkeit, da es bei der mittlerweile gültigen Novelle der StVO 2021 keine Berücksichtigung mehr fand und auch nicht in den Verkehrszeichenkatalog aufgenommen wurde. Es war geplant, dass die Anzahl der Personen im Fahrzeug den Besetzungsgrad angeben sollte, also in Abbildung 7 mindestens 3 Personen.



Abbildung 7: VZ mehrfach besetzte Fahrzeuge Deutschland
(Bundesanstalt für Straßenwesen 2018)

Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge können sowohl auf der linken als auch auf der rechten Fahrbahnseite angeordnet werden, für beide Systeme gibt es erfolgreiche Beispiele, allerdings dominieren zahlenmäßig die linksseitig angeordneten HOV-Lanes. Zur Abgrenzung der Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge kommen sowohl Fahrbahnmarkierungen als auch bauliche Maßnahmen, etwa niedrige Betongleitwände zum Einsatz. Um die Gefahr einer Fehlnutzung der Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge zu reduzieren, empfiehlt es sich, bereits in der Planung Möglichkeiten zur Kontrolle vorzusehen (Schijns und Eng 2006). Dies kann baulich mittels beidseitigem Seitenstreifen oder Nothaltebuchten erfolgen. Untersuchungen aus den USA zeigen, dass HOV-Lanes mit engem Kontrollraster lediglich eine Fehlnutzungsrate von 2 % aufweisen, während auf Strecken ohne Kontrollmöglichkeiten

bis zu 50 % der Nutzer von HOV-Lanes nicht dazu berechtigt wären (Schijns und Eng 2006). Vermehrt wird auch versucht mittels Überkopf-Detektion und Mobilfunkdaten den Besetzungsgrad von PKW zu ermitteln. Hier bilden die rechtssichere Erfassung und der Datenschutz derzeit noch veritable Hindernisse. Positive Erfahrungen wurden in den USA zuletzt mit Infrarot-Detektion aus Schilderbrücken sowie speziellen Apps gemacht (Rempel 2020).

HOV-Lanes zählen zu den ältesten Managed Lanes. Zum ersten Mal kam das System im Jahr 1969 in Virginia zum Einsatz (Chang et al. 2008), damals als Weiterentwicklung einer Busspur auf einem Interstate Highway. Das Projekt bewährte sich schnell, sodass insbesondere in den frühen 1970er-Jahren im Umfeld der Metropolregionen eine Reihe von HOV-Lanes etabliert wurde (Wood et al. 2021). Heute kommen HOV-Lanes weltweit zum Einsatz, von Australien und China über Südafrika bis nach Europa.

Bei der Einrichtung von HOV-Lanes ist darauf zu achten, dass die Systemlänge ausreichend lang gewählt ist, um Zeitverluste durch Hol- und Bring-Fahrten auszugleichen, die bei der Bildung von Fahrgemeinschaften anfallen können. Bei der Planung einer solchen Fahrspur ist es aus Gründen der Akzeptanz wichtig, dass es nicht zu „leeren“ Spuren kommt, sondern auch die Fahrspuren für hochbesetzte Fahrzeuge eine hohe Auslastung aufweisen. Dies kann, falls das Potenzial an Fahrgemeinschaften zu gering ist, durch die Modifikation der HOV-Lane hin zu einer HOT-Lane geschehen. Bei HOT-Lanes (high-occupancy toll lanes) handelt es sich um Fahrstreifen oder Streckensektionen, die neben dem ÖPNV und hochbesetzten Fahrzeugen auch Fahrzeugführern offenstehen, die bereit sind, eine Maut oder Nutzungsgebühr zu bezahlen. Die Höhe der Nutzungsgebühr wird in der Regel in Abhängigkeit der aktuellen Verkehrsdichte dynamisch festgesetzt. Priorität genießen stets der ÖPNV sowie hochbesetzte Fahrzeuge, sodass mit zunehmender Zahl dieser Straßennutzer die Nutzungsgebühr für Alleinfahrer ansteigt. Die erreichbare durchschnittliche Geschwindigkeit auf dem Sondernutzungsstreifen muss stets über der der allgemeinen Fahrstreifen liegen. Dies kann bedeuten, dass in den Spitzenstunden lediglich die Berechtigten der HOV-Lane die HOT-Lane nutzen dürfen. Abbildung 8 zeigt beispielhaft die Beschilderung ein HOT-Lane, welche Autofahrer im Vorfeld sehen. Deutlich zu erkennen sind die variablen Preise, welche sich im Tagesgang ändern können. Mit Fahrt auf die HOT-Lane stimmt der Fahrer der Abbuchung der angegebenen Kosten von einem Referenzkonto oder einer Kreditkarte zu. Sollte es während der Nutzung der HOT-Lane zu einer Anpassung der Kosten kommen, trifft diese stets nur die neu einfahrenden Fahrzeuge und nicht die bereits in der Spur befindlichen, da diese keine Wahlmöglichkeit mehr haben.

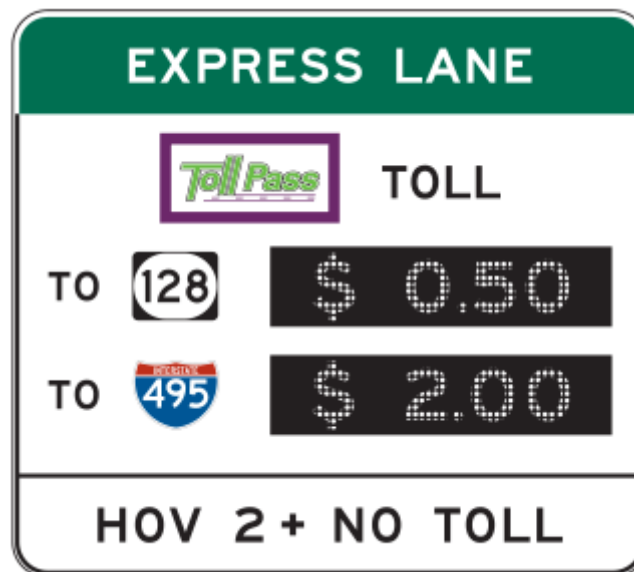


Abbildung 8: Beispiel HOT-Lane (Tantillo et al. 2020)

Das Ziel von Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge ist vorrangig, die Leistungsfähigkeit hinsichtlich des Personendurchsatzes pro Stunde zu erhöhen. Dies geschieht durch eine Erhöhung des durchschnittlichen Besetzungsgrads der Fahrzeuge durch den Anreiz mittels einer Fahrgemeinschaft oder ÖPNV schneller sein Ziel zu erreichen.

Abbildung 9 zeigt schematisch die Anordnung einer HOV-Lane auf dem 4. Fahrstreifen einer 4-streifigen Autobahn. Die Fahrbahn ist in regelmäßigen Abständen mit Rauten markiert, um allen Verkehrsteilnehmern die Besonderheit der Fahrspur zu verdeutlichen. Die Fahrspur für hochbesetzte Fahrzeuge ist mittels durchgezogener Doppellinie im Breitstrich von den regulären Fahrstreifen getrennt. Zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit sowie zur Möglichkeit der Kontrolle ist in Fahrtrichtung links neben dem Sondernutzungstreifen noch ein zusätzlicher Standstreifen vorhanden.



Abbildung 9: System HOV-Lane (All of San Antonio 2020)

Abbildung 10 zeigt die praktische Umsetzung einer HOV-Lane im urbanen Umfeld. Die Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge sind hier auf den Fahrstreifen 5 und 6 einer 6-streifigen Autobahn angeordnet. Anders als im Schema in Abbildung 9 ist die HOV-Lane hier 2-spurig ausgebildet, in den USA wird dieses System auch als „freeway within freeway“ bezeichnet (Tantillo et al. 2020). Die HOV-Lane ist hier widerstandslos-baulich mittels fest verbauter, zerstörbarer Pylonen bzw. Leitkegeln von den regulären Fahrstreifen getrennt. Hinzu kommt eine doppelte Markierung mit durchgezogener Doppellinie im Breitstrich. In Fahrtrichtung links neben dem 3. Fahrstreifen ist ein Standstreifen angeordnet.



Abbildung 10: Beispiel HOV-Lane (Tantillo et al. 2020)

2.3.2 Wechselverkehrsstreifen (Reversible Lanes)

Bei Wechselverkehrsstreifen, in Amerika Reversible Lanes, in Großbritannien tidal flow genannt, handelt es sich um Fahrstreifen, welche im Tagesverlauf in unterschiedliche Fahrtrichtungen befahren werden. Häufig kommen sie auf Straßen mit einer ungeraden Anzahl von Fahrstreifen oder in Baustellenbereichen zum Einsatz, wenn die Tagesganglinien des Verkehrs ausgeprägte Spitzen in unterschiedliche Fahrtrichtungen aufweisen und die Kapazität pro Fahrtrichtung in den Spitzenstunden nicht mehr ausreichend ist. In vorausgegangenen Untersuchungen zeigte sich, dass Wechselverkehrsstreifen insbesondere dann erfolgreich waren, wenn das Verhältnis der Verkehrsstärken pro Fahrtrichtung mindestens 2:1, besser sogar über 70 % in der dann dominanten Fahrtrichtung ist (Townes et al. 2004). Seltener werden Wechselverkehrsstreifen auch tageweise gestaltet, sodass beispielsweise zum Wochenbeginn die Zulaufstrecken auf die Metropolen gestärkt werden, während zum Wochenende den Rückreisestrecken zusätzliche Kapazitäten zugeschlagen werden, oder wenn im Umfeld von Großveranstaltungen außergewöhnliche hohe Verkehrsmengen in eine bestimmte Fahrtrichtung zu erwarten sind. Daneben gibt es noch eine Sonderform von Wechselverkehrsspuren im Bereich der Gefahrenabwehr. Diese werden im Fall von Notfällen oder Evakuierungsmaßnahmen aktiviert und sollen den Menschen eine möglichst schnelle Flucht aus Risikogebieten ermöglichen.

Ziel der Wechselverkehrsstreifen ist eine möglichst effiziente Ausnutzung der Kapazität, da freie Fahrstreifen konsequent für die jeweilige Nachfrage genutzt werden. Hinsichtlich der Realisierung werden zwei Arten von Wechselverkehrsstreifen unterschieden. Zum einen gibt

es die Möglichkeit einen Fahrstreifen dauerhaft von den regulären Fahrstreifen abzutrennen und am Anfang sowie Ende mit Schleusen zu versehen, welche verhindern, dass versehentlich nicht berechnigte Fahrzeuge in den Gegenverkehr der Reversible Lane geraten. Zum anderen kann mittels einer verschiebbaren Mittelleitwand die Aufteilung des Straßenraums flexibel geändert werden (Guebert 2010). Abbildung 11 zeigt ein Beispiel eines Wechselverkehrsstreifens mit verschiebblicher Mittelleitwand. Das System wird in Europa exklusiv von der Firma Sitec Verkehrstechnik GmbH vertrieben (Stand 2022). Bei diesem System wird eine niedrige Betonleitwand von einer speziellen Maschine aufgenommen und um eine Fahrspur versetzt. Dies ist möglich, da die einzelnen Segmente der Betonleitwand nur eine begrenzte Länge aufweisen und gelenkig miteinander verbunden sind. Der Vorteil dabei ist, dass das Versetzen im fließenden Verkehr geschehen kann und dafür keine Fahrstreifen gesperrt werden müssen. Zusätzlich entfallen die unfallanfälligen Schleusen im Zufahrts- und Ausfahrtsbereich eines fest verbauten Wechselverkehrsstreifens. Im Falle eines Anpralls, beispielsweise durch einen Unfall, ist der Wirkungsbereich des Systems größer als bei fest verdübelten Elementen, allerdings ist Durchbrechen der Mittelleitwand kaum möglich. Die Maschine zum Versetzen der Segmente fährt immer in die Fahrtrichtung, in welcher der Fahrstreifen zurückgenommen wird. Dadurch müssen keine weiteren Absicherungen errichtet werden.



Abbildung 11: Wechselverkehrsstreifen mit verschiebbbarer Mittelleitwand (Lindsay Corporation 2022)

Abbildung 12 zeigt beispielhaft die Schleusen eines permanenten Wechselverkehrsstreifens. Für die Fahrzeuge in Fahrtrichtung rechts ist die Schleuse derzeit geschlossen, während das

violettfarbene Fahrzeuge in Fahrtrichtung links die Reversible Lane nutzt. Um zu verhindern, dass es im Wechselverkehrsstreifen zu Kollisionen mit gegenläufigem Verkehr kommt, müssen die Schleusen in beide Fahrrichtungen zwischen dem Richtungswechsel eine ausreichend lange Zeit (Räumzeit + mindestens 30 Minuten) geschlossen sein, währenddessen der Fahrstreifen ungenutzt ist.



Abbildung 12: Beispiel Schleuse Wechselverkehrsstreifen (Versilis Inc. 2020)

Eine der ersten Reversible Lanes wurde im Jahr 1928 in Los Angeles eingeführt (Townes et al. 2004). Damit wurde dem damals zunehmenden Verkehr in den Städten Rechnung getragen, indem morgens mehr Fahrzeuge in die Stadt fahren konnten und abends mehr Kapazität für den Rückweg zur Verfügung stand. Nach den Anfängen im städtischen Raum wurden insbesondere ab den 1970er-Jahren verstärkt Wechselverkehrsstreifen auch auf Autobahnen eingesetzt. Der Einsatz blieb nicht auf die USA beschränkt, sondern findet heute weltweit Anwendung, hauptsächlich in Australien und Teilen Europas. Die Längen variieren dabei von wenigen 100 m, welche einen Straßenblock umfassen, bis zu 150 km und mehr (Townes et al. 2004).

Die Beschilderung von Wechselverkehrsstreifen erfolgt im Fall von verschiebbaren Mittelleitwänden weitgehend über dynamische Anzeigen am Fahrbahnrand, in Ausnahmefällen kommen auch statische Schilder zum Einsatz. Bei baulich getrennten Wechselverkehrsspuren kommen im Portalbereich häufig Schilderbrücken zum Einsatz. Diese werden im Vorlauf durch dynamische oder statische Schilder ergänzt. Zudem werden im Bereich der Schleuse in aller Regel auch Schranken und Barken verwendet, um die Verkehrsteilnehmer auf die Gefahrenstellen hinzuweisen. Im Fall von baulich getrennten Wechselverkehrsstreifen können diese auch mit weiteren verkehrssteuernden Maßnahmen,

wie beispielsweise einem Mindestbesetzungsgrad, kombiniert werden, was dann Eingang in die Beschilderung findet.

2.3.3 Seitenstreifenfreigabe (Hard Shoulder Running)

Die Seitenstreifenfreigabe, auch Temporäre Seitenstreifenfreigabe (TSF) beziehungsweise Hard Shoulder Running im Englischen, ist eine der auf deutschen Autobahnen am weitest verbreiteten Maßnahme zur Verkehrssteuerung. Sie wird daher im Folgenden weniger detailliert vorgestellt als etwa die Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge. Für detaillierte Informationen zu diesem Thema wird auf die vorangegangenen Veröffentlichungen, beispielsweise von Waleczek (Waleczek 2020) und das Reference Handbook for harmonized ITS Core Service Deployment in Europe (BASt 2021) der European ITS Platform verwiesen.

Seitenstreifenfreigaben dienen insbesondere der Beseitigung von Kapazitätsengpässen und Aufrechterhaltung des Verkehrsflusses. Dabei wird zwischen statischen und dynamischen Seitenstreifenfreigaben unterschieden. Bei statischen Seitenstreifenfreigaben wird der Seitenstreifen unabhängig von der aktuellen Verkehrsbelastung der regulären Fahrstreifen zu festen Zeiten, wie den Spitzenstunden, oder Anlässen geöffnet. Demgegenüber ist bei dynamischen Seitenstreifenfreigaben, neben den weiteren Einsatzkriterien, die aktuelle Auslastung der regulären Fahrstreifen maßgebend, ob diese aktiviert wird. Statische Seitenstreifenfreigaben kommen in den USA seit Mitte der 1970er-Jahre zum Einsatz (Jenior et al. 2016). Der Schwerpunkt der Nutzung liegt im Bereich der Metropolregionen der Ostküste sowie vereinzelt im Süden des Landes. Teilweise sind die Seitenstreifenfreigaben dort auf bestimmte Fahrzeugtypen wie Busse oder hochbesetzte Fahrzeuge begrenzt (Jenior et al. 2016). Eine Weiterentwicklung der statischen Seitenstreifenfreigabe ist die dynamische Seitenstreifenfreigabe. Diese wurde in Europa entwickelt und kam 1996 erstmals in Deutschland und den Niederlanden zum Einsatz (Waleczek 2020). Das System konnte sich schnell etablieren und wird mittlerweile in einer Vielzahl an Ländern weltweit angewandt. In den USA wurden einige statische in dynamische Seitenstreifenfreigaben umgewandelt.

Bei der Planung und baulichen Umsetzung einer TSF ist zu berücksichtigen, dass durch die zeitweise Umnutzung des Standstreifens eine sichere Abstellmöglichkeit für Pannenfahrzeuge, Einsatzfahrzeuge oder Ähnliches entfällt. Daher sind in regelmäßigen Abständen, in der Praxis haben sich rund 500 m etabliert, zusätzliche Nothaltebuchten vorzusehen. Zusätzlich ist die gesamte Streckenlänge mit Videodetektion auszustatten, um vor der Freigabe des Seitenstreifens seine Befahrbarkeit zu prüfen. Ebenso wird während der Nutzung des Standstreifens überwacht, dass kein Fahrzeug die TSF blockiert. In diesem Fall wird die Seitenstreifenfreigabe sofort aufgehoben.

Die Beschilderung und Anzeige von Seitenstreifenfreigaben erfolgt abhängig davon, ob es sich um ein statisches oder dynamisches System handelt, mittels permanenter, teils noch aus Blech bestehender, Beschilderung oder dynamischen LED-Anzeigen oder Prismenwendern.

In Deutschland werden TSF mit den Verkehrszeichen 223 mit Unternummern, in Abbildung 13 die blauen Schilder links und mittig, sowie Verkehrszeichen der Untergruppe 1013 mit Unternummern, in Abbildung 13 rechts, angezeigt. Ergänzt werden diese Schilder häufig durch grüne Pfeile, beziehungsweise rote Kreuze, wie sie in Abbildung 14 zu sehen sind, welche jedoch nicht als offizielle Verkehrszeichen in der StVO sowie dem Verkehrszeichenkatalog (VzKat) gelistet sind.



Abbildung 13: Beschilderung Seitenstreifenfreigabe (Deutschland und Bundesanstalt für Straßenwesen 2017; Bundesanstalt für Straßenwesen 2018)

Abbildung 14 zeigt ein Beispiel einer statischen Seitenstreifenfreigabe eines Interstate Highways in den USA. Im Vordergrund ist das Zeitfenster zur Nutzung zu erkennen, in diesem Fall von Montag bis Freitag von 5:30 Uhr bis 11:00 Uhr, im Hintergrund sieht man, die Beschilderung, die eine Benutzung der Spur aktuell untersagt.



Abbildung 14: Statische Seitenstreifenfreigabe (Jenior et al. 2016)

Die zusätzliche Kapazität einer Seitenstreifenfreigabe liegt unter der eines regulären Fahrstreifens. Nach praktischen Erfahrungen, welche in die Regelwerke Eingang gefunden haben, liegt die Kapazität bei rund 900 Kfz/h (FGSV 2015).

2.3.4 Zuflussregelung (Ramp Metering)

Zuflussregelung, auch Zuflussdosierung oder umgangssprachlich Pfortnerampeln, im Englischen Ramp Metering, bezeichnet die belastungsabhängige Beschränkung der Zufahrt zu einer Straße, zumeist Autobahn. Dabei wird im Bereich der Zufahrtsrampen eine Lichtsignalanlage (LSA) installiert, welche den Zufluss auf die Autobahn harmonisiert und reguliert. Dies geschieht, indem die LSA nur eine begrenzte Anzahl an Fahrzeugen pro Zeiteinheit (in der Regel Minuten) von der Zufahrtsrampe auf den Beschleunigungsstreifen fahren lässt. Mittels Schleifendetektoren im Boden oder Videodetektion löst die LSA nach einer festgelegten Menge an Fahrzeugen pro Minute das Rotlicht aus.

Ähnlich den Seitenstreifenfreigaben, wird auch bei der Zuflussregelung zwischen statischen und dynamischen Systemen unterschieden. Statische Zuflussdosierungsanlagen sind LSA, welche im Bereich der Rampen verbaut und dauerhaft hinsichtlich Betriebszeit und Zuflussmenge programmiert sind. Grundlage sind Erfahrungswerte zur durchschnittlichen Belastung der betroffenen Streckenabschnitte. Demgegenüber messen bei der dynamischen Zuflussregelung Detektoren sowohl im Oberlauf, als auch im Unterlauf der Anschlussstelle den Verkehrsfluss und schalten abhängig von Geschwindigkeit und Verkehrsdichte die LSA. Detektoren im Bereich der Rampe messen den Rückstau im nachgeordneten Wegenetz und ändern die Umlaufzeiten der LSA, falls die Verlustzeiten unverhältnismäßig groß werden.

Die erste Anlage zur Zuflussregelung wurde 1963 in den USA aufgestellt. Dort ist diese Art der Verkehrsbeeinflussung bis heute populär, speziell in Ballungsgebieten an den Küsten (Arnold, JR. 1998). In Deutschland und Europa kommen LSA zur Zuflussdosierung seit den 1980ern im Einsatz. Die erste Anlage entstand in England, kurze Zeit später folgten eine Reihe von Anlagen in Kontinentaleuropa, besonders in Frankreich, Deutschland und den Niederlanden (Highways Agency 2007). In Deutschland liegt der Schwerpunkt in Nordrhein-Westfalen, weitere Anlagen befinden sich in Bayern und Baden-Württemberg.

Zuflussdosierung nimmt Einfluss auf den Verkehr, indem die Menge der von außen in die Strecke fließenden Fahrzeuge reduziert und homogenisiert wird. Kommt es im Bereich einer Anschlussstelle zu einer hohen Zahl an Einfahrtvorgängen und trifft dies auf eine bereits stark ausgelastete Strecke, nimmt die Verkehrssicherheit in diesem Bereich deutlich ab. Fahrzeuge der Hauptfahrbahn tendieren, insbesondere, wenn sie die Strecke regelmäßig befahren, im Bereich solcher Anschlussstellen zu Spurwechseln auf den 2. oder 3. Fahrstreifen, um einerseits Lücken für die einfahrenden Fahrzeuge zu schaffen und andererseits riskante Einfahrtvorgänge präventiv zu meiden. Diese aus Sicht der Hauptfahrbahn unnötigen Spurwechsel, welche nicht mit einem Überholvorgang verbunden sind, führen zu einem allgemeinen Geschwindigkeitsverlust und teils riskanten Bremsmanövern. Dies kann in der

Folge zu Stoßwellen und sogar Stauungen stromaufwärts führen. Die zufahrenden Fahrzeuge treffen ihrerseits auf einen stark ausgelasteten 1. Fahrstreifen, welcher nur wenige und darüber hinaus kurze Folgezeitlücken für einen sicheren Verflechtungsvorgang auf die Hauptfahrbahn bereithält. Dies kann riskante Verflechtungsvorgänge auslösen, die zu einem beträchtlich erhöhten Unfallgeschehen an hochbelasteten Anschlussstellen führen. Verstärkt wird dieser Trend noch dadurch, dass die Fahrzeuge häufig im Pulk die Beschleunigungsspur befahren und versuchen gemeinsam in insgesamt zu kleine Folgezeitlücken zu verflechten, oder während des Beschleunigungsprozesses keine geeignete Verflechtungsmöglichkeit in den Hauptstrom erhalten, abbremsen müssen und dann aus einem sehr geringen Geschwindigkeitsniveau heraus einen neuen Verflechtungsvorgang starten. Dadurch wird wiederum das Geschwindigkeitsniveau der Hauptfahrbahn negativ beeinflusst. Die negativen Auswirkungen können häufig bis zu 2 km stromwärts beobachtet werden (Highways Agency 2007). Durch die Installation von LSA zur Zuflussregelung können diese Phänomene reduziert und teilweise sogar beseitigt werden. Durch die Auflösung von einfahrenden Fahrzeugpulk haben Fahrzeuge ausreichend Zeit eine genügend große Lücke im Verkehr der Hauptstrecke zu finden, ohne dabei von weiteren beschleunigenden Fahrzeugen unter Druck gesetzt zu werden. Verkehrsteilnehmer der durchgehenden Strecke wiederum sehen eher von unnötigen Spurwechseln ab und behalten ihre Geschwindigkeit bei. Untersuchungen aus den USA zeigen, dass die Zahl von Unfällen durch Zuflussregelungen um 50 % reduziert und die Fahrgeschwindigkeit um bis zu 62 % gesteigert werden konnte (Arnold, JR. 1998).



Abbildung 16: Praxisbeispiel Zuflussregelung (Straßenverkehrszentrale Baden-Württemberg 2018)

Bei der Planung von Anlagen zur Zuflussregelung ist darauf zu achten, dass im Zulaufbereich auf die LSA ausreichend lange Rückstauflächen vorhanden sind, um den Verkehr im nachgeordneten Wegenetz nicht stärker als unbedingt notwendig zu beeinträchtigen. Der Leitfaden für Ramp Metering des kalifornischen Verkehrsministeriums fordert als Mindestlänge die Fläche, welche 7 % der Fahrzeuge in der Spitzenstunde benötigen (California Department of Transportation 2016). Bei einer durchschnittlichen Fahrzeuglänge von 4,40 m und einer Verkehrsbelastung von 1.200 Fahrzeugen in der Spitzenstunde ergibt sich eine notwendige Aufstellfläche für 84 Fahrzeuge mit einer Gesamtlänge von 370 m. Hinsichtlich der Länge der Grünphasen, gibt es in den USA die Einsatzempfehlung, pro Stunde zwischen 240 und 900 Fahrzeuge passieren zu lassen. Bei einem Unterschreiten dieser Werte zeigte sich in der Praxis eine erhebliche Zunahme der Rotlichtverstöße, bei einem Überschreiten der Werte verliert die LSA ihre Wirksamkeit bezüglich der Vereinzelung der Fahrzeuge (California Department of Transportation 2016).

2.3.5 Dynamische Straßennutzungsgebühren (Congestion Pricing)

Dynamische Straßennutzungsgebühren, im Englischen Congestion Pricing, bezeichnen Managed Lanes aus dem Bereich der finanziellen Widerstände, bei der die Straßennutzungsgebühren in Abhängigkeit von ausgewählten Faktoren wie Verkehrsdichte, Immissionswerten oder Fahrzeugtyp dynamisch festgesetzt werden. Die Grundidee dahinter stammt nicht aus dem Bereich des Straßenwesens, sondern wurde 1952 von William Vickrey zur Entlastung der New Yorker U-Bahnen entwickelt (Vickrey 1992). In den folgenden Jahren entwickelte er das Konzept weiter, sodass es auf Straßen angewandt werden konnte (Vickrey 1963). Die Grundlage des Systems sind marktwirtschaftliche Überlegungen, dass bei einem

gleichbleibenden Angebot an Kapazität bei gestiegener Nachfrage die Preise für die Straßenbenutzung ebenfalls steigen. Abweichend von den rein wirtschaftlichen Überlegungen, spielen im Bereich der Verkehrssteuerung heute weniger die Profitmaximierung, als vielmehr die verkehrlenkenden Eigenschaften von finanziellen Widerständen entlang des Fahrtwegs eine Rolle.

Im Laufe der Zeit haben sich vier Arten des Congestion Pricing herausgebildet.

- *Fahrstreifenbezogene dynamische Nutzungsgebühren* kommen insbesondere außerorts auf HOT-Fahrstreifen oder Expressspuren vor. Dabei werden, wie der Name sagt, einzelne Fahrstreifen bepreist, die Nutzern einen Vorteil hinsichtlich Reisezeit oder anderen Komfortgewinnen liefern. Die Fahrstreifen sind in der Regel baulich getrennt, um eine Umgehung der kostenpflichtigen Einfahrtbereiche zu verhindern.
- *Streckenbezogene dynamische Nutzungsgebühren* kommen sowohl innerorts als auch außerorts vor. Im Gegensatz zu den fahrstreifenbezogenen dynamischen Nutzungsgebühren sind hier alle Fahrstreifen kostenpflichtig. Dies kann bei kurzen, eng begrenzten, besonderen Streckenabschnitten wie Tunneln oder Brücken der Fall sein, es können aber auch ganze Streckenzüge zur Verkehrssteuerung betroffen sein.
- *Zonen- oder gebietsbezogene dynamische Nutzungsgebühren* kommen vorwiegend innerorts zum Einsatz. Eine Vielzahl von Städten, beispielsweise London, Singapur oder Stockholm und New York verlangen für die Einfahrt von Fahrzeugen in ausgewiesene Innenstadtbereich eine Gebühr, welche über den Tag und den Fahrzeugtyp variabel ist. Vorrangiges Ziel ist hier die verkehrliche Entlastung der Innenstädte und die Stärkung des ÖPNV. Nachdem die Gebühren für die Einfahrt bezahlt worden sind, können die Fahrzeuge ohne Beschränkungen und weitere Kosten frei in den Zonen fahren.
- *Flächendeckende, systemweite dynamische Nutzungsgebühren* haben einen ähnlichen Ansatz wie die vorgenannten zonen- oder gebietsbezogenen Nutzungsgebühren. Auch sie beziehen sich vornehmlich auf Innenstadtbereiche und sollen primär der verkehrlichen Entlastung dienen. Der Unterschied zwischen diesen beiden Systemen ist, dass hier alle Fahrten innerhalb der ausgewiesenen Zone kostenpflichtig sind und nicht mit einer pauschalen Gebühr bei der Einfahrt abgegolten sind.

Untersuchungen aus den USA sowie Großbritannien zeigen, dass durch dynamische Straßennutzungsgebühren die Anzahl an Staus je nach Projekt um 13 % bis 30 % reduziert werden konnten (Pike 2010). Gleichzeitig konnte die erreichte Geschwindigkeit um mindestens 10 % gesteigert werden, in Ausnahmefällen sogar mehr als vervierfacht (Congressional Budget Office 2009). Damit einhergehen auch eine verbesserte Verkehrssicherheit und eine größere Zuverlässigkeit bezüglich der Reisezeiten. Das Maß der Verbesserung ist dabei stets vom Ausgangswert der belasteten Streckenzüge und der Zahl der Verspätungen abhängig.

In der Praxis kommen dynamische Straßennutzungsgebühren häufig in Verbindung mit weiteren Elementen der Managed Lanes zum Einsatz. Weit verbreitet ist insbesondere die Anwendung im Bereich von HOT-Lanes (siehe hierzu Kapitel 2.3.1), wo freie Kapazitäten eines Sonderfahrstreifens an zahlende Fahrzeuge vergeben werden. Weitere Einsatzbereiche sind Expressspuren sowie Städte mit Umweltzonen oder City-Maut.



Abbildung 17: Beispiel dynamisch bepreister Highway (Dorries 2018)

Abbildung 17 zeigt beispielhaft die Ausgestaltung einer mit dynamischen Nutzungsgebühren belegten Straße. In der Abbildung sind die beiden linken Fahrstreifen kostenpflichtig. Die Preise werden in der Überkopfschilderung angezeigt, die Fahrtstrecke mittels Videodetektion oder Transpondersystemen erfasst. Der angezeigte Preis ist dabei variabel und reagiert auf die aktuellen Verkehrsbedingungen. Ändert sich der Preis, so gilt für die Fahrzeuge, die zu diesem Zeitpunkt bereits die Detektoren passiert haben, der zu diesem Zeitpunkt angezeigte. Die Kameras werden mittlerweile meist in der Regel wie in Abbildung 18 dargestellt installiert. Fahrzeuge fahren unter Portalen, welche mit Kameras ausgerüstet sind und die fahrstreifenscharf die Kennzeichen erkennen. Eine Geschwindigkeitsreduktion oder andere Zusatzmaßnahmen zur Identifikation oder zum Einziehen der Gebühren sind nicht erforderlich. Zumeist ist jedoch eine Registrierung für eine automatische Abbuchung der Gebühren mittels Kreditkarte erforderlich. Dies wird stets in der Beschilderung angezeigt. Im Beispiel in Abbildung 17 müssen Nutzer beim „E-ZPass“ registriert sein, wie das oberste weiße Schild mit violettfarbenem Logo anzeigt. Der „E-ZPass“ ist ein in den USA weitverbreitetes Transpondersystem zur Abrechnung von Mautstrecken. Die früher gebräuchlichen Mautstationen, die teilweise auch mit Personal besetzt waren, sind mittlerweile nicht mehr gebräuchlich, da sie den Verkehrsfluss behindern.



Abbildung 18: Videodetektion Congestion Pricing (NETWORK DISPATCHES 2013)

Bei der Realisierung von dynamischen Straßennutzungsgebühren ist, neben einer soliden Planung, die interne und externe Projektkommunikation von größter Bedeutung. Dynamische Straßennutzungsgebühren entfalten eine substantielle monetäre sowie verkehrsverlagernde Wirkung, welche unterschiedliche Erwartungshaltungen bei den Projektbeteiligten wecken können. Die Projektziele müssen daher von Anfang an klar definiert sein. Dazu zählen im finanziellen Bereich die Verwendung sowie der Umfang der erwirtschafteten Mittel. Hier muss geklärt sein, ob das System zur Erzielung maximaler Einnahmen angelegt werden soll, oder ob die Gelder eher als „Nebenprodukt“ eines finanziellen Streckenwiderstands anfallen. Im Rahmen von verkehrstechnischen Untersuchungen sind die Verlagerungswirkungen einer solchen Maßnahme zu prüfen und aufbauend darauf, ein geeigneter Netzzuschnitt zu wählen. Je nach Planungsziel können hier einzelne Streckenabschnitte oder ganze Netze betroffen sein. In der externen Projektkommunikation sind Ursache und Wirkung der Maßnahme auch für Laien nachvollziehbar aufzuarbeiten. Dynamische Straßennutzungsgebühren belasten insbesondere Pendler, welche aufgrund ihrer Arbeitssituation auf ein Fahrzeug angewiesen sind und einen weiteren Fahrweg haben. Diese Eigenschaften treffen vornehmlich auf Beschäftigte in unterdurchschnittlich bezahlten Berufen und geringerem Einkommen zu. Die Frage der sozialen Gerechtigkeit ist hier zu berücksichtigen und zu adressieren. Die Belastungen können sowohl finanzieller Natur sein, wenn künftig zum Erreichen des Arbeitsplatzes zusätzliche Kosten entstehen, oder den zeitlichen Faktor betreffen, wenn beispielsweise Expressspuren gegen ein Entgelt genutzt und damit die Fahrzeit zulasten der restlichen Fahrstreifen verkürzt werden kann. Ungewollten sozialen Härten kann mit Rabatten

oder Ausnahmen für bestimmte Nutzergruppen oder einem spürbar und zielgerichtet verbesserten ÖPNV entgegengewirkt werden.

2.4 Steuerung von Managed Lanes

Bei der Steuerung von Managed Lanes kommen Algorithmen zum Einsatz, die zumindest teilweise die Steuerung des Verkehrsflusses übernehmen. Bei den Algorithmen muss unterschieden werden, ob sie im Vorfeld der Maßnahme zum Einsatz kommen und der Optimierung der Modellierung dienen oder ob sie in Echtzeit Verkehrsdaten erfassen und darauf aufbauend aktiv in die Verkehrssteuerung eingreifen. In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf dem Verkehrsablauf, sodass hier nur solche Algorithmen betrachtet werden, die direkten Einfluss auf das Verkehrsgeschehen nehmen.

Den Rahmen für Algorithmen zur Verkehrssteuerung setzt in Deutschland das Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ), welches von der Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht wird (BASt 2018) und derzeit in der Fassung von 2018 vorliegt. Darin werden Anforderungen an die Systeme, insbesondere hinsichtlich Sicherheit und einheitlicher Nomenklatur gesetzt.

2.4.1 Fahrstreifen für mehrfachbesetzte Fahrzeuge

Für die Steuerung von Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge muss zwischen den HOV-Lanes, also Fahrstreifen exklusiv für hochbesetzte Fahrzeuge und den ÖPNV, und HOT-Lanes, also Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge, den ÖPNV sowie zahlende Verkehrsteilnehmer, unterschieden werden.

Bei reinen HOV-Lanes liegen in der Regel keine komplexen Algorithmen hinter der Steuerung, da die Aktivierung des Fahrstreifens in aller Regel festen Rahmenbedingungen wie der Tageszeit folgt oder die Sondernutzung sogar dauerhaft angeordnet ist.

Anders stellt sich die Situation bei HOT-Lanes dar. Die meisten Betreiber halten die Algorithmen unter Verschluss, sodass in der Regel für jedes Projekt individuelle Algorithmen zum Einsatz kommen. Im Unterschied zu anderen Managed Lane Systemen hat sich hier daher auch keine namentliche Bezeichnung für bestimmte Algorithmen, wie beispielsweise „ALINEA“ bei der Zuflussdosierung, entwickelt. Eine der wenigen Ausnahmen bildet hier der MnPASS oder auch E-Z-Pass in Minnesota, dessen Algorithmus vollständig veröffentlicht wurde (Lombardi et al. 2021). Dennoch lassen sich verschiedene Gruppen von Algorithmen bestimmen, wobei die Unterscheidung nach Parametern und Arbeitsweisen erfolgt. Eine mögliche Unterscheidung ist in Abbildung 19 dargestellt. Dabei wird nach steuerungs-basierten Algorithmen und optimierungsbasierten Algorithmen unterschieden. Steuerungs-basierte Algorithmen können in fahrzeugbezogene und streckenbezogene Algorithmen unterteilt werden. Diese dienen in der Regel primär der Aufrechterhaltung des Verkehrsflusses (Lombardi et al. 2021). (Laval et al. 2015) unterscheiden in ihrer Veröffentlichung, ob der

Algorithmus der Optimierung der Staulänge oder einer Reduzierung des Zeitverlusts dient. Dabei unterteilen sie zusätzlich, ob das Optimum für den gesteuerten Fahrstreifen, die Hauptfahrbahn oder den gesamten Fahrbahnquerschnitt ermittelt wird. In der Praxis haben Algorithmen zur Optimierung des Zeitverlusts derzeit Vorteile.

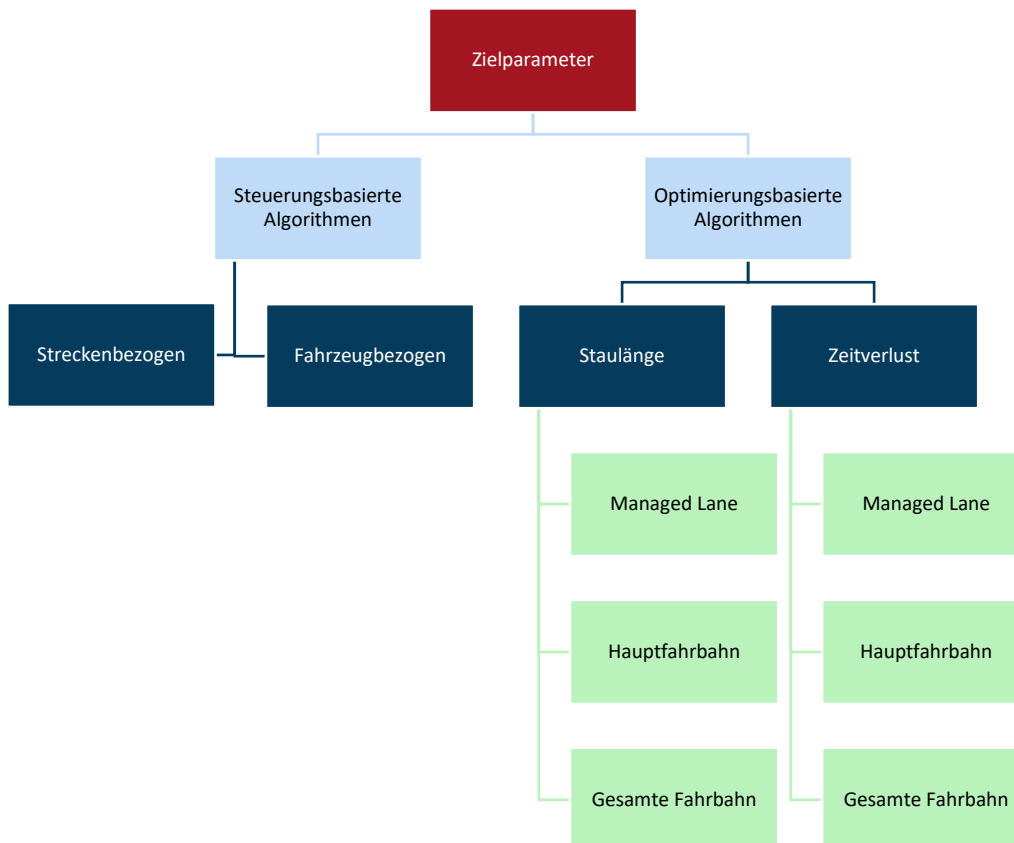


Abbildung 19: Zielparameter von Kostenalgorithmen nach (Laval et al. 2015) und (Lombardi et al. 2021)

2.4.2 Wechselverkehrsstreifen

Wechselverkehrsstreifen werden bisher hauptsächlich konventionell, sprich nach festen Zeitschemata oder sogar händisch gesteuert. Dies wird in der Praxis häufig ergänzt durch Systeme, welche Detektoren, beispielsweise in Form von Videodetektion, mittels KI überwachen und somit dafür sorgen, dass keine Fehlnutzung oder versehentliche Freigabe in beide Fahrrichtungen erfolgen kann. Allerdings werden Wechselverkehrsstreifen in der Forschung als der Einsatzbereich von Managed Lanes gesehen, der künftig mit die größten Potenziale für die Nutzung von Algorithmen bietet (Conceição et al. 2020). Grundlage hierfür ist der flächendeckende Einsatz von automatisierten Fahrzeugen sowie einer funktionierenden V2I oder V2X Infrastruktur. In diesem Fall können Fahrzeuge und Infrastruktur untereinander kommunizieren und mittels Algorithmen ein Systemoptimum finden, welches dann auch gewichtet sein kann, um positiv gewertete Mobilität zu bevorzugen.

Zur perspektivischen Implementierung von Wechselverkehrsstreifen im automatisierten Verkehr gibt es eine Reihe von Ansätzen. Fast allen ist ihr heuristischer Ansatz gemein, da es

sich bei den vorliegenden Problemen um Optimierungen handelt, für die Lösungen nur näherungsweise gefunden werden können. (Hausknecht et al. 2011) nimmt in seiner Veröffentlichung die Evakuierungspläne einiger amerikanischer Großstädte als Grundlage, um darauf aufbauend einen Ansatz für Wechselverkehrsstreifen im täglichen Gebrauch zu definieren. Dabei verwendet er einen Ansatz aus der klassischen linearen Programmierung. (Conceição et al. 2020) setzt in seinen Überlegungen auf einen AV-Ansatz, bei dem die Fahrzeuge über freie Fahrstreifen informiert werden und sich untereinander sowie mit der Infrastruktur über die optimale Nutzung des Straßenraums verständigen. Ein weiterer Ansatz, welcher beispielsweise von (Xie et al. 2010) verfolgt wird, ist die Verwendung eines „lagrangian relaxation-based tabu search“ Algorithmus, der verschiedene Verfahren der Optimierung aufgreift. Mit leistungsfähigeren Computern wurden unter anderem von (Lu et al. 2018) in den letzten Jahren Bi-Level-Modelle für die Programmierung herangezogen, welche für zwei Parameter ein Systemoptimum im Modell errechnen. Einen anderen Ansatz wählen (Wei et al. 2017 - 2017), die ihr Modell auf der BPR-Funktion sowie abstrahierten Umweltkosten gründen.

2.4.3 Temporäre Seitenstreifenfreigabe

Während bei Anlagen zur statischen Seitenstreifenfreigabe aufgrund fester und dauerhafter Beschilderungen keine dynamische Steuerung erforderlich ist, werden für die temporäre Seitenstreifenfreigabe (TSF) aufwendige Steuerungsverfahren benötigt. Diese dienen zum einen dazu, um Gefahrenstellen während des Betriebs der TSF erkennen und darauf zu reagieren zu können und zum anderen der Steuerung der Einsatzempfehlungen. Die temporäre Freigabe der Seitenstreifen erlaubt es, in einem gewissen Belastungsfenster der Hauptfahrbahnen, die Kapazität des Querschnitts um rund 1.500 Kfz/h zu erhöhen. Bei zu geringen Verkehrszahlen sowie zu hoher Belastung bringt das System jedoch keine Vorteile mehr. Für die Aktivierung der TSF kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz, manuelle, halbautomatische und automatische. Bei den manuellen Verfahren gibt der Computer dem Operator in der Verkehrszentrale ein Signal, dass die Rahmenbedingungen für die Freigabe der TSF erfüllt sind, dieser löst dann manuell verschiedene Schritte und FreigabeprozEDUREN aus. Auch bei den halbautomatischen Verfahren erhält der Operator die Nachricht über die passenden Rahmenbedingungen, hier löst er dann mit einer Freigabe der TSF einen automatisierten Freigabeprozess aus. Bei den automatisierten Prozessen löst das System bei Vorliegen vorab definierter Rahmenbedingungen bei deren Eintreten automatisch die Freischaltung der TSF aus. Der Operator wird lediglich informiert, dass die TSF gestartet wurde. (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2012; Cacilo et al. 2015)

Zentrales Element der Algorithmen zur Steuerung einer TSF sind die Algorithmen der „Incident Detection Algorithms“ (IDA, deutsch automatische Störungserkennung). Diese können nach (Evans et al. 2020; Martin et al. 2001) folgendermaßen eingeteilt werden:

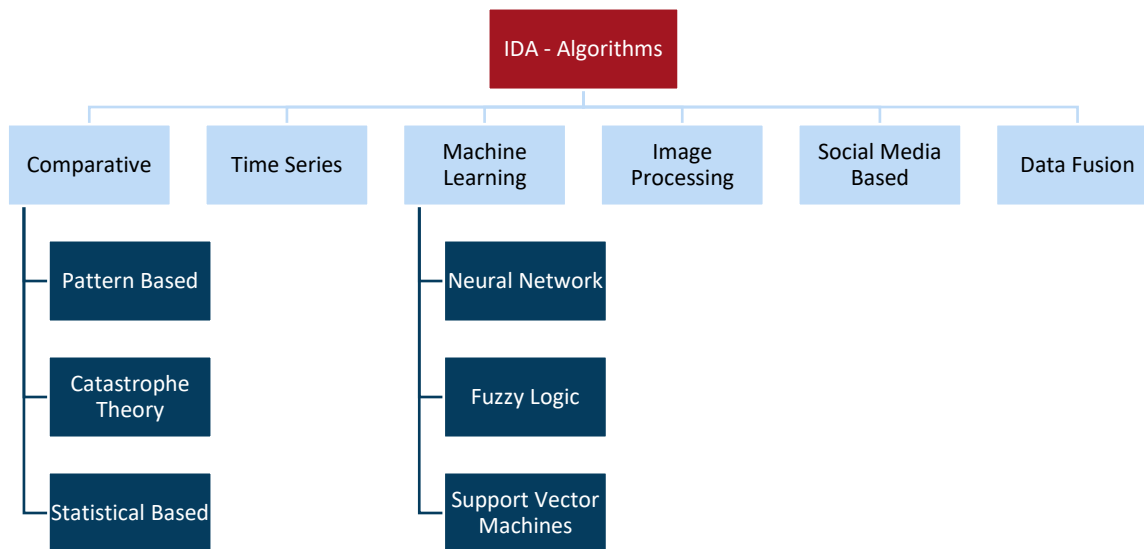


Abbildung 20: Stammbaum der IDA nach (Martin et al. 2001; Evans et al. 2020)

In Abbildung 20 werden nur für die Gruppen der Comparative Algorithms und der Machine Learning Algorithms noch weitere Abstufungen vorgenommen. Dies dient der Vereinfachung und Übersichtlichkeit. In der Literatur, beispielsweise bei (Evans et al. 2020), werden für alle Arten der IDA-Algorithmen noch genauere Unterteilungen vorgenommen und beschrieben. In der Praxis sind derzeit die Comparative Algorithms und die Machine Learning Algorithms am bedeutendsten und am weitest verbreitetsten, sodass diese beispielhaft genauer betrachtet werden. Dabei können auch diese Arten von Algorithmen noch genauer aufgeschlüsselt werden, etwa die Pattern Based Algorithms in die APID-Algorithmen und die California (TSC) Algorithmen (Martin et al. 2001). Die Gruppe der Comparative Algorithms zählt zu den ältesten Algorithmen der IDA-Algorithmen. Bis zu Beginn der 1990er-Jahre stammten bis auf einige Time Series Algorithmen alle Anwendungsfälle aus der dieser Gruppe. Mit fortschreitender Digitalisierung und leistungsfähigeren Computern entwickelten sich über die vergangenen Jahre eine Vielzahl an neuen Algorithmen, welche die bisher dominanten Comparative Algorithms deutlich zurückgedrängt haben. Für die Seitenstreifenfreigabe besonders bedeutend sind darüber hinaus die Image Processing Algorithms, welche auf Basis von entlang der Strecke installierten Kameras die Störungsfreiheit überwachen.

2.4.4 Zuflussregelung

Anlagen zur Zuflussregelung kamen erstmals in den 1960er-Jahren in den USA zum Einsatz. Zu Beginn waren die Möglichkeiten zur Steuerung der Lichtsignalanlagen noch sehr begrenzt, sodass hier einfachste Programme zum Einsatz kamen, deren Steuerung ausschließlich auf der Tageszeit beruhte oder sogar noch von Hand gesteuert wurden (Bogenberger und May 1999). Über die Zeit und mit fortschreitenden technischen Möglichkeiten, entwickelten sich in

den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl an Algorithmen für die Steuerung von Zufluss geregelten Rampen, sodass bei dieser Art der Managed Lane die größte Varianz an frei zugänglichen und eigens benannten Algorithmen zur Verfügung steht. Im Folgenden werden lediglich die Kategorisierung sowie einige ausgewählte Algorithmen vorgestellt. Für weitergehende Informationen wird auf die Arbeiten von (Zhang et al. 2001), (Bogenberger und May 1999) sowie (Ghanbartehrani et al. 2020) verwiesen. Der Stammbaum der Algorithmen zur Zuflussregelung an Rampen ist in Abbildung 22 abgebildet.

Die Eingangsparameter der Algorithmen werden, wie in Abbildung 21 abgebildet, an unterschiedlichen Stellen im System erhoben. Im Zuge der Hauptfahrbahn werden sowohl im Oberstrom-, als auch im Unterstrombereich, wobei die Detektoren im Unterstrombereich hier nicht mehr dargestellt sind, mittels Detektoren die Geschwindigkeit und die Fahrzeugdichte ermittelt. Im Bereich der Rampe wird vor der Haltelinie an der LSA mittels Induktionsschleife geprüft, ob aktuell ein Fahrzeug in die Hauptfahrbahn einfahren möchte. Überdies ist am Ende der Aufstellfläche der Rampe ein Detektor angeordnet, der auslöst, wenn die Aufstellfläche erschöpft ist, sowie ggf. weitere Detektoren im Verlauf der Rampe, die die aktuelle Rückstaulänge angeben.

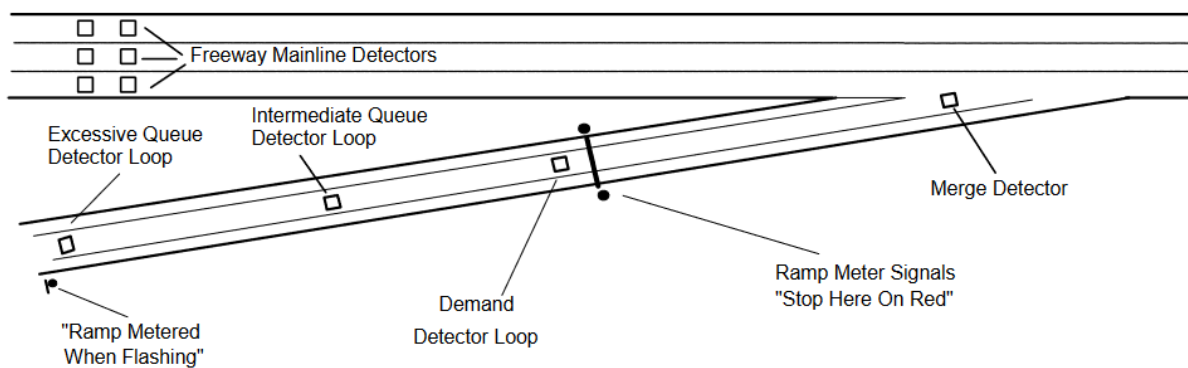


Abbildung 21: Eingangsparemeter Ramp Metering (Chaudhary et al. 2004)

Grundsätzlich können zwei Arten von Algorithmen zur Steuerung von Rampen unterschieden werden. Auf der einen Seite stehen lokal gesteuerte Anlagen, welche ausschließlich eine Rampe betreffen. Demgegenüber stehen koordinierte Anlagen, die mehrere Rampen gleichzeitig ansteuern und so ein Netz von untereinander kommunizierenden Rampen schaffen. Historisch gesehen, sind die lokalen Steuerungsalgorithmen deutlich älter, diese kommen aber bis heute häufig zum Einsatz. Ihre Vorteile sind die geringe Komplexität und Störanfälligkeit, die es verhältnismäßig einfach macht, ein solches System zu implementieren, bei einer gleichzeitig relativ guten Wirksamkeit, was insgesamt zu einem guten, häufig ausreichenden Aufwands-Nutzen-Verhältnis führt. Die klaren Schwächen dieses Systems liegen darin, nur lokal wirksam zu sein und keine großräumigen Probleme lösen zu können.

Koordinierte Algorithmen erlangen durch die Vernetzung mehrerer Rampen eine deutlich größere Wirksamkeit auf den Verkehrsfluss. Dadurch können auch großräumige Problemstellungen gelöst, sowie durch eine einheitliche Steuerung Synergien erzeugt werden.

Dies bedeutet jedoch ein deutlich komplexeres Design der Algorithmen, das mit einem erhöhten Datenbedarf einhergeht. Insgesamt sind diese Systeme deutlich kostenintensiver und anfälliger für Störungen. Dennoch überwiegen in bestimmten Situationen die Vorteile der koordinierten Steuerung, was zu einem stetig wachsenden Marktanteil führt.

Die Algorithmen der koordinierten Steuerung können nochmals unterteilt werden in

- kooperative
- konkurrierende
- integrale

Algorithmen. Kooperative Algorithmen stellen dabei eine Weiterentwicklung der lokalen Algorithmen dar, indem sie auf Grundlage aller Eingangsgrößen versuchen, die Rückstaulängen der Rampen sowie den Verkehrsfluss der Hauptfahrbahn zu optimieren. Dabei agieren die meisten Algorithmen jedoch reaktiv und greifen nicht vorausschauend, aktiv in den Verkehrsfluss ein. Bei den konkurrierenden Algorithmen wird zunächst für jede Rampe einzeln die erforderliche und mögliche Freigabezeit ermittelt. Anschließend wird der restriktivste Fall für alle Rampen im Netz angewandt. Dabei können noch zusätzliche Elemente in der Entscheidungsfindung, wie die maximale Rückstaulänge, berücksichtigt werden. Den integralen Algorithmen ist stets ein konkreter Steuerungszweck zugeordnet, unter anderem die Optimierung der Fahrzeit der Hauptfahrbahn oder den maximalen Durchsatz an Fahrzeugen. Diesem Ziel werden die Auswirkungen auf die anderen Parameter untergeordnet. Zusätzlich können noch weitere Rahmenbedingungen definiert werden, sodass beispielsweise eine Überstauung der Aufstellflächen verhindert wird. Integrale Algorithmen sind die komplexeste, aber auch wirkmächtigste Gruppe unter den Algorithmen, da sie auch aktiv steuernd auf den Verkehrsfluss einwirken können. Hierfür benötigen sie eine besonders gute Datengrundlage und klare Rahmenbedingungen. Im Gegenzug können dadurch jedoch auch beträchtliche Verbesserung im Streckennetz erreicht werden (Zhang et al. 2001).

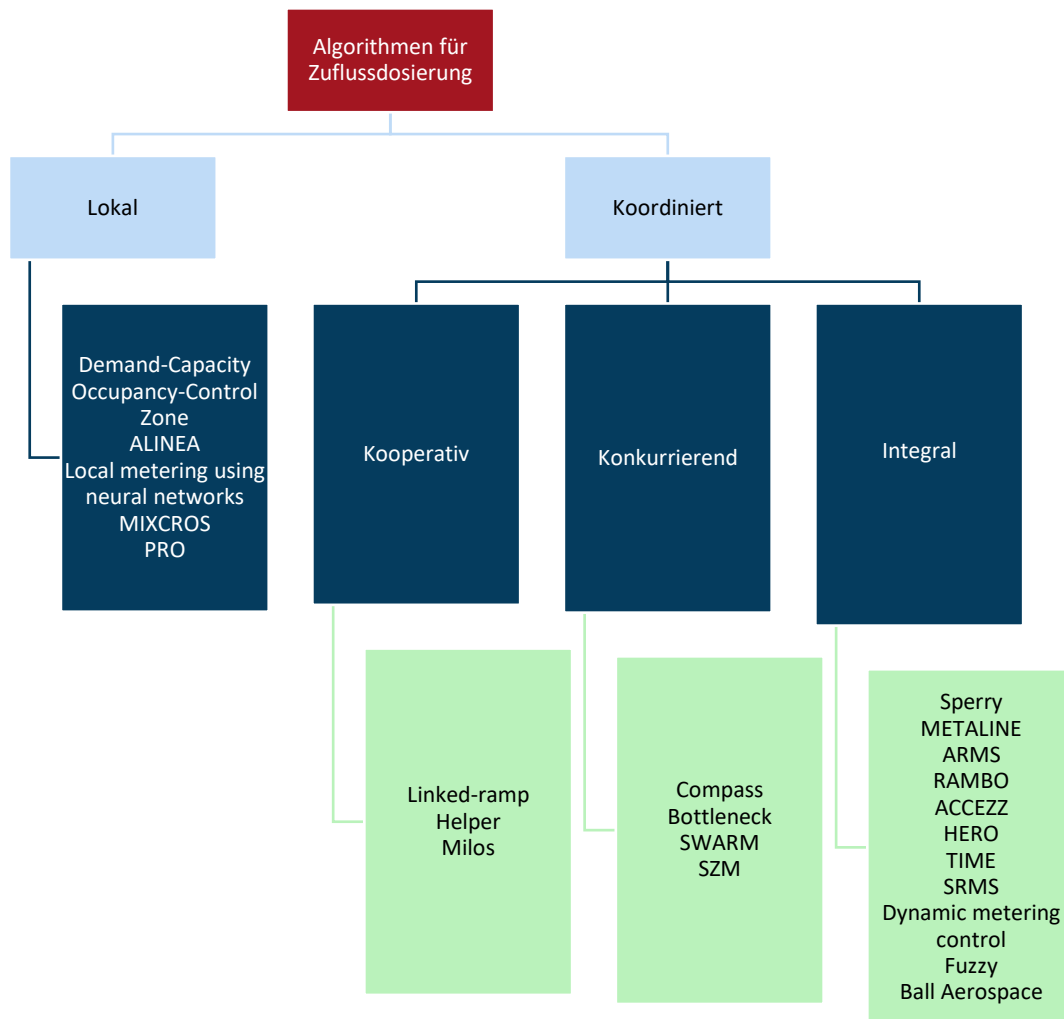


Abbildung 22: Stammbaum Algorithmen Zuflussregelung nach (Zhang et al. 2001)

2.4.5 Dynamische Straßennutzungsgebühren

Bei den dynamischen Straßennutzungsgebühren handelt es sich um eine Weiterentwicklung der klassischen Maut- und Gebührensysteme. Diese waren in der Regel statisch, es wurde also unabhängig von Tageszeit, Verkehrsdichte oder Fahrzeugklasse ein pauschales Entgelt erhoben. War bei den klassischen Maut- und Gebührensystemen die Refinanzierung der Infrastruktur häufig das vorherrschende Motiv, werden dynamische Straßennutzungsgebühren heute häufig aus verkehrslenkenden und –steuernden Gründen eingesetzt. Dabei sind die Faktoren Umgriff, Kostenvariabilität, Nutzerdifferenzierung und die Technologie zu unterscheiden. Der Umgriff legt fest, ob lediglich ein einzelnes Bauwerk, wie eine Brücke, ein Tunnel oder ein einzelnes Streckensegment bepreist wird, oder ob eine Gebietsmaut für definierte Bereiche, etwa Innenstädte wie bei der City-Maut in London oder Singapur, erhoben wird, oder ob eine allgemeine distanzabhängige Maut eingeführt wird. Bei der Kostenvariabilität wird festgelegt, in welchem Rahmen sich die einzelnen Gebühren bewegen und welche Auslöser zu einer Erhöhung oder einer Absenkung der Gebühren führen. Dies können zeitliche Rahmenbedingungen sein, ebenso wie Grenzwerte hinsichtlich

Verkehrsdichte oder Geschwindigkeit. Eng damit verbunden ist die Nutzerdifferenzierung, bei welcher festgelegt wird, ob bestimmte Fahrzeugklassen oder Nutzergruppen Rabatt erhalten oder einen Aufschlag zahlen müssen. Ein klassisches Beispiel hierfür stellen Anwohner dar, welche beispielsweise in London Rabatt auf die City-Maut erhalten, oder Fahrgemeinschaften, welche einen teilweise bis auf 0 ermäßigten Rabatt für bestimmte Streckenabschnitte erhalten. Damit ebenfalls eng verbunden ist die Technologie, welche zur Erhebung der Gebühren und Steuerung der Verkehrsströme zum Einsatz kommt. (Palma und Lindsey 2009)

Ähnlich den Algorithmen bei den Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge, werden von vielen Betreibern auch die Algorithmen für dynamische Straßennutzungsgebühren unter Verschluss gehalten. Generell werden die Ansätze in letzter Zeit hauptsächlich in expertengestützte Systeme und selbstoptimierende Systeme unterteilt, wobei bei expertengestützten Ansätzen feste von Experten entwickelte Logiken zugrunde liegen, welche anhand bestimmter Auslösewerte gewählt werden, während bei selbstoptimierenden Systemen KI-gestützte Algorithmen die Systeme fortwährend verändern und optimieren (Hashemi und Abdelghany 2018). Im Folgenden wird daher zunächst nur auf allgemeine Ansätze eingegangen. (Yin und Lou 2009) entwickelten 2009 einen rückgekoppelten Steuerungsansatz, welcher deutliche Parallelen zum ALINEA-Algorithmus der Zuflussdosierung aufweist. Hierbei werden stromabwärts Sensoren oder Detektoren verbaut, welche die Auswirkungen der aktuellen Konfiguration fortwährend evaluieren und entsprechend anpassen.

Eine weitere Möglichkeit, die ebenfalls von (Yin und Lou 2009) entwickelt wurde, ist ein KI-basierter selbstlernender Ansatz. Dieser ermittelt durch Sensoren und Detektoren durchgängig die Entwicklungen bei Verkehrsdichte und Geschwindigkeit und verknüpft diese Informationen mit den jeweils gültigen Informationen für die Verkehrsteilnehmer sowie den Rahmenbedingungen. Auf diese Weise kann die Software bestimmte Verkehrszustände antizipieren und bereits proaktiv darauf eingehen, indem unter anderem die Kostensätze angepasst werden. Durch die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich Rückschlüsse auf die Zahlungsbereitschaft der Verkehrsteilnehmer zu unterschiedlichen Uhrzeiten oder Verkehrszuständen ziehen, welche dann Eingang in die optimierte Verkehrssteuerung finden.

(Hashemi und Abdelghany 2018) nutzten 2018 für ihren Ansatz einer End-to-End Deep Learning Methode die stetig wachsenden Möglichkeiten durch steigende Rechenleistung und Weiterentwicklung von KI. Ihr Ansatz optimiert die Verkehrsbedingungen anhand möglichst effizienter Verkehrsmanagementpläne.

Ausgangspunkt für viele Ansätze von Algorithmen der dynamischen Straßennutzungsgebühren sind zwei Anwendungen, DYNASMART-X und DynaMIT.

Das DYNASMART-X System liefert quasi in Echtzeit Aussagen zum Netzzustand und sagt Verkehrsflüsse voraus und ist in der Lage, zeitgleich die Auswirkungen von Steuerungsmaßnahmen sowie von Informationen für Verkehrsteilnehmer zu ermitteln. Dies geschieht nicht nur an einzelnen Knoten, sondern im Netzzusammenhang. (Mahmassani 2001)

Das DynaMIT und DynaMIT 2.0 System haben eine ähnliche Funktionsweise wie das DYNASMART-X System. Aufgrund historischer Daten sowie Echtzeit-Erhebungen mittels Sensoren, Kameras und Detektoren sowie Mobilfunkdaten werden in Echtzeit der aktuelle Verkehrszustand ermittelt und Vorhersagen getroffen. Aus diesen Informationen werden die Auswirkungen von verkehrssteuernden Maßnahmen prognostiziert. In der Version 2.0 wurde das System um Elemente wie genauere Fahrzeugklassen, Auswirkungen von dynamischen Navigationsgeräten und dynamische Preisgestaltung erweitert. (Ben-Akiva et al. 2012; M. Milkovits et al. 2010)

2.5 Auswirkungen von Managed Lanes

Die unterschiedlichen Arten von Managed Lanes verfolgen unterschiedliche Zielstellungen und haben entsprechend auch unterschiedliche Wirkweisen auf den Verkehr. Im Folgenden werden die fünf in dieser Arbeit maßgebenden hinsichtlich der Auswirkungen auf die Attribute

- Verkehrssicherheit, also die Auswirkungen auf die Höhe des Unfallrisikos sowie der Unfallfolgen
- Kapazität, welche hier als die maximale Verkehrsstärke pro Querschnitt definiert ist
- Verlagerungswirkung hinsichtlich der Routenwahl, also ob durch eine Maßnahme eine Verdrängungswirkung ins benachbarte Wegenetz auftritt
- Verkehrsmittelwahl, gleichbedeutend mit der Wahl des Transportmittels (Alleinfahrer, Fahrgemeinschaft, ÖPNV, ...)
- Leichtigkeit des Verkehrs, womit ein möglichst ungestörter Verkehrsfluss beschrieben wird

beurteilt. Die Bewertung erfolgt dabei immer auf einer Skala von 0 bis 4, die genaue Einteilung ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Wirkweise Managed Lane

Stufe	Bedeutung	Kriterien
0	Keine oder sogar negative Auswirkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Das Attribut hat keine Relevanz für die Maßnahme • Die Maßnahme führt zu einer Verschlechterung im Vergleich zum Ausgangszustand
1	Geringe Auswirkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Die Maßnahme hat messbare Auswirkungen, die allerdings keinen substantziellen Einfluss auf das Attribut haben
2	Mäßige bis mittlere Auswirkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Die Maßnahme hat deutlich messbare Auswirkungen auf das Attribut, die auch einen spürbaren Einfluss haben, dabei aber noch nicht dominant sind.
3	Starke Auswirkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Die Maßnahme hat erhebliche Relevanz für das Attribut und hat erheblichen Einfluss auf das Gesamtsystem, wobei es von stärkeren Attributen noch geschlagen wird.
4	Sehr starke Auswirkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Die Maßnahme ist dominant für das Attribut und führt zu maßgeblichen Veränderungen.

Die Ergebnisse werden in einem Kivitat-Diagramm dargestellt.

Generell können die Maßnahmen grob in Push-Maßnahmen und Pull-Maßnahmen unterteilt werden. Diese Unterteilung stammt ursprünglich aus der Migrationstheorie und beschreibt, ob eine Maßnahme eher einen verdrängenden Charakter hat (Push-Faktoren) oder ob es sich eher um Anreizsysteme (Pull-Faktoren) handelt, welche eine Verhaltensänderung herbeiführen sollen. (Schwedde 2018)

2.5.1 Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge

Bei Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge, also HOV-Lanes oder HOT-Lanes, handelt es sich grundsätzlich um Pull-Maßnahmen. Diese können, falls sie auf einem bestehenden Fahrstreifen zulasten des regulären Querschnitts errichtet werden, jedoch auch einen Push-Anteil haben, wenn das bisherige Fahrverhalten erschwert wird.

Die Bewertung der einzelnen Kriterien erfolgt auf Grundlage der Ergebnisse von (Poole 2020; Shewmake 2012) sowie eigenen Resultaten. Die Zusammenfassung der einzelnen Elemente ist in Abbildung 23 dargestellt.

Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge haben zunächst keinen positiven Effekt auf die Verkehrssicherheit. Durch die häufige Reduktion der regulären Fahrstreifen steigt vielmehr die Verkehrsdichte in diesen an, sodass hier sogar von einer Verschlechterung der Verkehrssicherheit ausgegangen werden muss. Auch wenn durch die Erweiterung eines zusätzlichen Fahrstreifens durch die Maßnahme keine Fahrstreifen für den regulären Verkehr verloren gehen, kommt es zumindest zu keiner Verbesserung der Verkehrssicherheit, noch dazu, da durch den Sonderfahrstreifen zusätzliche Verflechtungsvorgänge entstehen.

Hinsichtlich der Leichtigkeit des Verkehrs führen Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge insgesamt zu einer mäßigen Verbesserung. Ziel des Sonderfahrstreifens ist, dass dort der Verkehr dauerhaft in einer angemessenen Qualität abgewickelt wird. Dies kann zulasten der verbliebenen, ungesteuerten Fahrstreifen gehen, welche in Summe jedoch auch von einer reduzierten Zahl von Kfz, welche durch Fahrgemeinschaften entstehen können, profitieren können.

Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge haben einen spürbaren Effekt auf die Kapazität der Straße, wenn diese mittels Personendurchsatz pro Querschnitt gemessen wird und nicht nur über Kfz pro Querschnitt. Durch die potenziell erhöhten Besetzungsgrade eine Managed Lane können mehr Personen den Querschnitt passieren, wobei dieser Effekt, wie eine Reihe von Untersuchungen zeigt, nicht überbewertet werden darf.

Die Verlagerungswirkung von HOV- bzw. HOT-Lanes ist nur gering einzustufen. Durch die Bildung von Fahrgemeinschaften kann es vorkommen, dass Menschen, die bisher andere Strecken für ihren Arbeitsweg genutzt haben, die Managed Lane nutzen. Gleichzeitig kann eine potenziell stärkere Auslastung der ungesteuerten Fahrstreifen dazu führen, dass Pendler auf andere Strecken ausweichen. In Summe sind diese Verlagerungswirkungen jedoch als nur gering einzustufen.

Ein Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge hat in der Regel spürbare Auswirkungen auf die Wahl des Verkehrsmittels. Diese Fahrstreifen schaffen häufig einen Anreiz, sich zumindest mit dem Thema Fahrgemeinschaft zu beschäftigen. Dennoch zeigt sich in der Praxis, dass das Verlagerungspotenzial begrenzt ist und es nur zu moderaten Veränderungen in der Zusammensetzung der Verkehrsmittelwahl kommt.

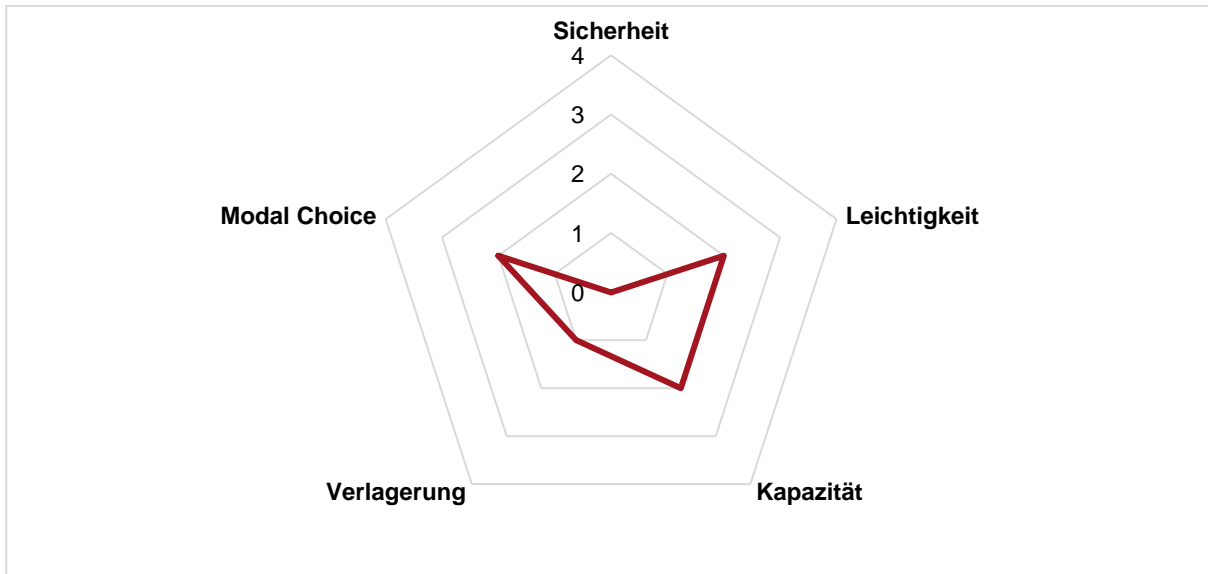


Abbildung 23: Auswirkungen von Fahrtstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge

2.5.2 Wechselverkehrsstreifen

Bei Wechselverkehrsstreifen handelt es sich um klassische Pull-Maßnahmen. Der zusätzliche Fahrtstreifen entlastet die bestehenden Fahrtstreifen und bündelt den Verkehr auf den leistungsfähigeren Strecken.

Für die Charakterisierung der Folgen von Wechselverkehrsstreifen werden neben eigenen Erkenntnissen auch die Arbeiten von (Pérez-Méndez et al. 2021; United States Department of Transportation 2022) herangezogen. Daraus ergeben sich die in Abbildung 24 dargestellten Auswirkungen.

Wechselverkehrsstreifen haben keinen positiven Einfluss auf die Verkehrssicherheit. Die Schleusen am Beginn und Ende der Strecke sind vielmehr potenzielle Schwachpunkte, an denen Fahrzeuge versehentlich in die für die Gegenrichtung freigegebene Fahrbahn gelangen könnten. Auch wenn Unfälle an diesen Stellen in der Vergangenheit nur sehr selten aufgetreten und die Strecken mittlerweile häufig mit intelligenten Sicherungssystemen ausgestattet sind, liegt die Gefährdung höher als bei regulären Streckenzügen.

Bezüglich der Leichtigkeit des Verkehrs bieten Wechselverkehrsstreifen ein erhebliches Potenzial. Durch die Freigabe eines oder mehrerer zusätzlicher Fahrtstreifen für den Hauptstrom in den Spitzenstunden wird der Verkehrsfluss substanziell verbessert. Die verringerte Verkehrsdichte führt zu einem verbesserten Verkehrsfluss. Problematisch ist lediglich, dass Wechselverkehrsstreifen häufig räumlich getrennt sind und im Fall eines havarierten oder verunfallten Wagens keine Ausweichmöglichkeit besteht.

Da die Kapazitäten des Wechselverkehrsstreifens nicht dauerhaft zur Verfügung stehen, sind die Auswirkungen auf die allgemeine Streckenkapazität schwächer als die bei der Leichtigkeit des Verkehrs. Zwar werden die zusätzlichen Kapazitäten stets dem stärkeren Verkehrsstrom

zugeschlagen, dies geht jedoch häufig zulasten des antizyklischen Verkehrsstroms. Zudem muss für die Zeit des Richtungswechsels des Wechselverkehrsstreifens der Fahrstreifen für einige Zeit komplett geräumt werden und steht keiner Richtungsfahrbahn zur Verfügung.

Aufgrund der nur begrenzt zur Verfügung stehenden Kapazitäten ist auch das Verlagerungspotenzial der Maßnahme begrenzt. Zwar werden in den Spitzenstunden die vorhandenen und durch freie Kapazitäten auch zusätzliche Verkehre aufgenommen, jedoch fehlen die für eine großräumige Verlagerung notwendigen dauerhaften Angebote an die Verkehrsteilnehmer.

Wechselverkehrsstreifen haben lediglich ein begrenztes Änderungspotenzial für die Verkehrsmittelwahl. Zwar besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die zusätzlichen Kapazitäten privilegierten Verkehrsteilnehmern zur Verfügung zu stellen und dadurch Einfluss auf die Nachfrage zu nehmen, in der Praxis erfolgt jedoch zumeist eine Freigabe für alle Verkehrsteilnehmer. Das geringe Verlagerungspotenzial fällt hier auch zugunsten des PKW-Verkehrs aus, zulasten des ÖPNV.

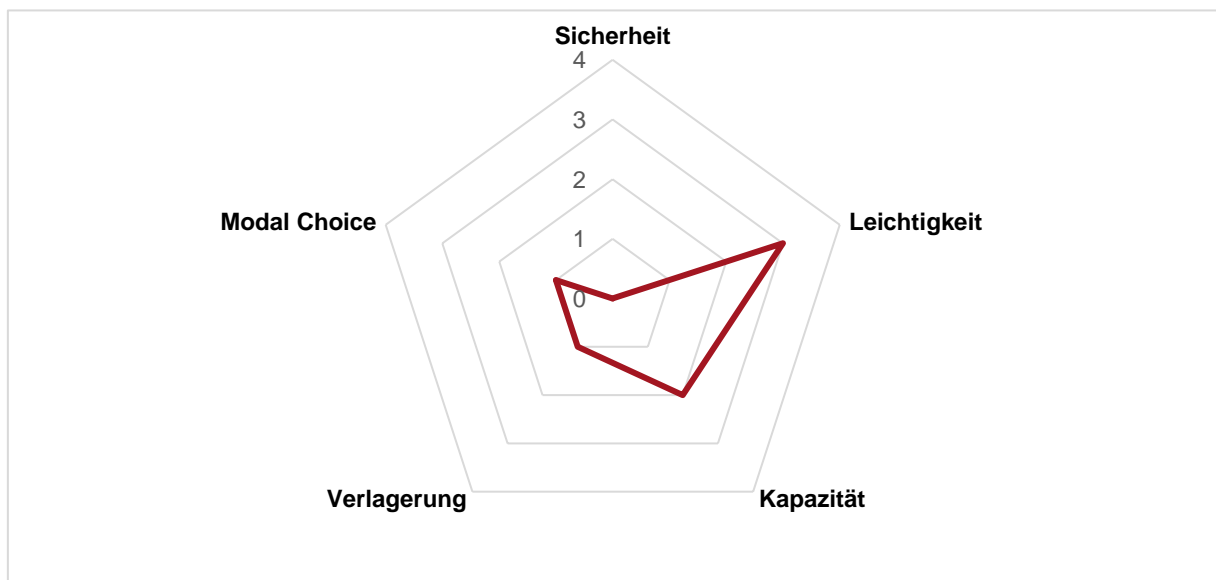


Abbildung 24: Auswirkungen von Wechselverkehrsstreifen

2.5.3 Seitenstreifenfreigabe

Die (temporäre) Seitenstreifenfreigabe ist eine klassische Pull-Maßnahme. Die zusätzlichen Kapazitäten sorgen für ein attraktiveres Angebot für die Verkehrsteilnehmer und ziehen tendenziell Verkehr von anderen, weniger komfortabel befahrbaren Strecken an.

(Temporäre) Seitenstreifenfreigaben zählen zu den in Deutschland am weitest verbreiteten Sonderfahrstreifen. Dementsprechend gibt es hier bereits umfangreiche Literatur, beispielsweise von (CEDR WG Traffic and Network Management 2018; European ITS Platform 2021). Gemeinsam mit eigenen Erkenntnissen wurden daraus die in Abbildung 25 dargestellten Auswirkungen einer Seitenstreifenfreigabe abgeleitet.

Die Verkehrssicherheit wird von (temporären) Seitenstreifenfreigaben nur unwesentlich beeinflusst. Zunächst führt der Wegfall eines durchgehenden Stand- oder Seitenstreifens zu einem verringerten Sicherheitsniveau im betreffenden Streckenabschnitt. Die Errichtung von Nothaltebuchten in regelmäßigen Abständen sowie die dauerhafte Überwachung, auch unter Zuhilfenahme von KI, reduzieren zwar die negativen Auswirkungen, können einen durchgehenden Seitenstreifen jedoch nicht ersetzen. Allerdings gehen Seitenstreifenfreigaben häufig mit Geschwindigkeitsbeschränkungen, meist 100 km/h, gelegentlich auch 80 km/h, einher. Diese führen zu einer Homogenisierung des Verkehrsflusses, sodass in Summe Seitenstreifenfreigaben einen gering positiven Effekt auf die Verkehrssicherheit haben.

Für die Leichtigkeit des Verkehrs haben Seitenstreifenfreigaben eine erhebliche Bedeutung. Durch die Möglichkeit bei höheren Verkehrsdichten einen zusätzlichen Fahrstreifen freizugeben, kann der Verkehrsfluss länger aufrechterhalten werden. Zudem führt auch die Homogenisierung der Geschwindigkeiten zu einem längeren Aufrechterhalten des Verkehrsflusses. Da die Kapazität jedoch nicht dauerhaft zur Verfügung steht und im Fall von Unfällen, schlechten Witterungsverhältnissen oder defekten Fahrzeugen kein Weiterbetrieb der Seitenstreifenfreigabe möglich ist, sind die Auswirkungen auf die Leichtigkeit des Verkehrs lediglich stark, aber nicht dominant.

Die Kapazität einer Straße wird durch eine Seitenstreifenfreigabe zunächst nicht verändert, da der Seitenstreifen nicht dauerhaft als Fahrbahn zur Verfügung steht. Durch die Freigabe eines zusätzlichen Fahrstreifens in der Spitzenstunde kann jedoch einer Überlastung vorgebeugt werden und der Streckenzug bleibt auch bei höherer Verkehrsnachfrage ohne grundlegenden Ausbau leistungsfähig.

Das Verlagerungspotenzial von Wechselverkehrsstreifen ist begrenzt, aber vorhanden. Durch das Wissen der Verkehrsteilnehmer, dass in vielen Fällen bei dichtem Verkehr ein zusätzlicher Fahrstreifen freigeschaltet wird, steigt der Anreiz auf diese Strecke auszuweichen. Allerdings sind die Reserven begrenzt. Es kommt in Summe zu einer Bündelung der Verkehre auf Hauptstrecken, ohne dabei in größerem Maße Verkehr zu induzieren.

Für die Verkehrsmittelwahl hat die Seitenstreifenfreigabe keine Bedeutung. Aufgrund des zusätzlichen Fahrstreifens, welcher jedoch nicht dauerhaft zur Verfügung und in aller Regel auch allen Verkehrsteilnehmern offensteht, sind keine Wechsel auf andere Verkehrsträger zu erwarten. Alleinfalls in geringem Umfang zugunsten des PKW-Verkehrs.

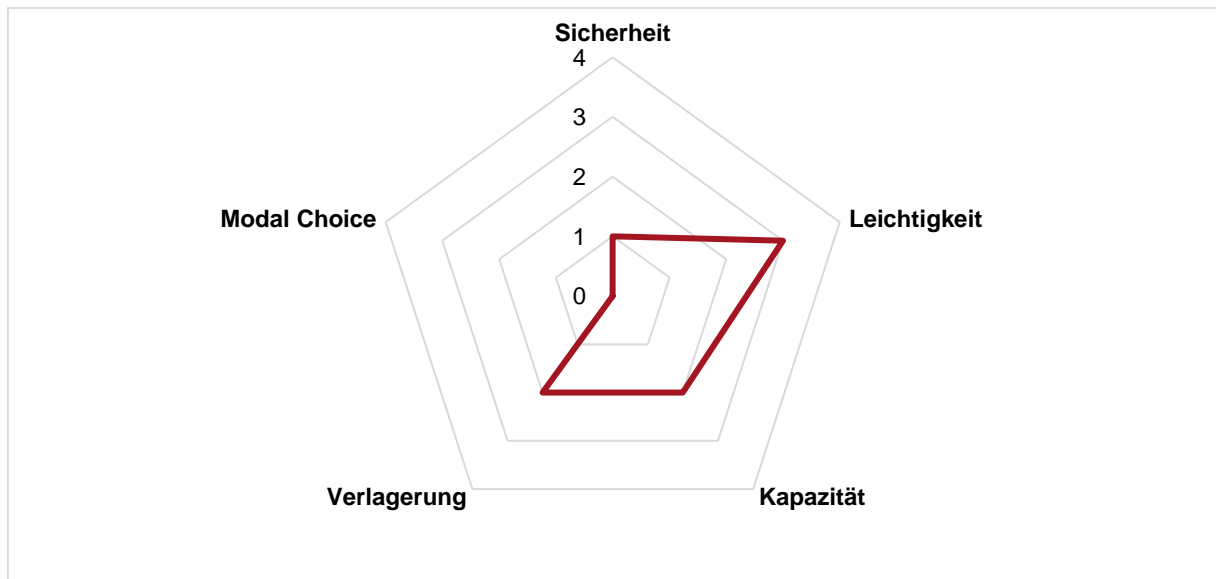


Abbildung 25: Auswirkungen von Seitenstreifenfreigaben

2.5.4 Zuflussregelung

Die Zuflussregelung oder Zuflussdosierung ist eine Push-Maßnahme. Durch die reduzierte Zugänglichkeit ausgewählter Streckenabschnitte werden die Verkehrsteilnehmer auf andere Routen oder Verkehrsmittel verdrängt.

Für die Bewertung der Auswirkungen von Maßnahmen der Zuflussregelung wird neben eigenen Erkenntnissen auch auf Ergebnisse von (European ITS Platform 2021; Haule et al. 2022) zurückgegriffen. Die Wirkweise für die einzelnen Attribute werden in Abbildung 26 dargestellt.

Anschlussstellen mit Zuflussregelung erhöhen die Sicherheit auf Autobahnen beträchtlich. Zum einen wird die maximale Verkehrsmenge, welche auf den betreffenden Streckenabschnitt auffahren kann, gedrosselt, sodass die Wahrscheinlichkeit einer Überlastung reduziert wird. Zum anderen führt der gedrosselte Zufluss dazu, dass die Verflechtung der auffahrenden Fahrzeuge sicherer und einfacher vonstattengeht. Dies liegt daran, dass gepulkte Auffahrten verhindert und bei zu dichtem Verkehr noch weiter entzerrt werden, um den einzelnen Fahrzeugen ein sicheres Verflechten in die Hauptfahrbahn zu ermöglichen. Nicht unerwähnt bleiben darf an dieser Stelle jedoch, dass die Beschränkung der Zufahrt auf die Autobahn potenziell zu einer erhöhten Belastung des nachgeordneten Wegenetzes führt, was dort zu einem erhöhten Unfallrisiko führen kann.

Für den Verkehrsfluss und die Leichtigkeit des Verkehrs hat die Zuflussregelung an Anschlussstellen maßgebenden Einfluss. Durch intelligente Zuflusssteuerung gelingt es, den Verkehrsfluss dauerhaft aufrechtzuerhalten und die vorhandene Kapazität optimal zu nutzen. Stauungen durch Überlastungen können weitestgehend ausgeschlossen werden.

Die Kapazität der Strecke wird durch die Zuflussregelung nicht bedeutend beeinflusst. Zwar wird die vorhandene Kapazität optimiert und voll ausgenutzt, es kommt de facto zu einer qualitativen Kapazitätserweiterung, jedoch nicht zu einer quantitativen Kapazitätserweiterung. In der Theorie können nicht mehr Fahrzeuge den Querschnitt passieren, in der Praxis kann dies jedoch durch intelligentes Verkehrsmanagement der Fall sein.

Insbesondere in den Spitzenstunden haben Anlagen zur Zuflussregelung eine Verlagerungswirkung. Vor allem Verkehrsteilnehmer mit kürzeren Wegstrecken nutzen durch mögliche Wartezeiten bei der Auffahrt auf die Autobahn alternative Strecken im nachgeordneten Netz oder wählen einen anderen Verkehrsträger. Verkehrsteilnehmer mit längeren Fahrtzeiten nehmen die Verzögerungen bei der Auffahrt auf die Autobahn in Kauf, da sich diese durch den besseren Verkehrsablauf amortisieren.

Ähnlich wie bei der Verlagerungswirkung verhält es sich mit der Verkehrsmittelwahl. Neben der Möglichkeit privilegierte Fahrzeuge an den Pfortnerampeln zu beschleunigen, sorgt die schlechtere Erreichbarkeit von Autobahnen dafür, dass Verkehrsteilnehmer auf das nachgeordnete Wegenetz sowie andere Verkehrsträger ausweichen. Da allerdings, speziell für Pendler mit längeren Wegstrecken, der harmonisierte Verkehr in der Hauptfahrbahn der Fernstrecken auch spürbare Vorteile bietet, ist das Verlagerungspotenzial nur mäßig ausgeprägt.

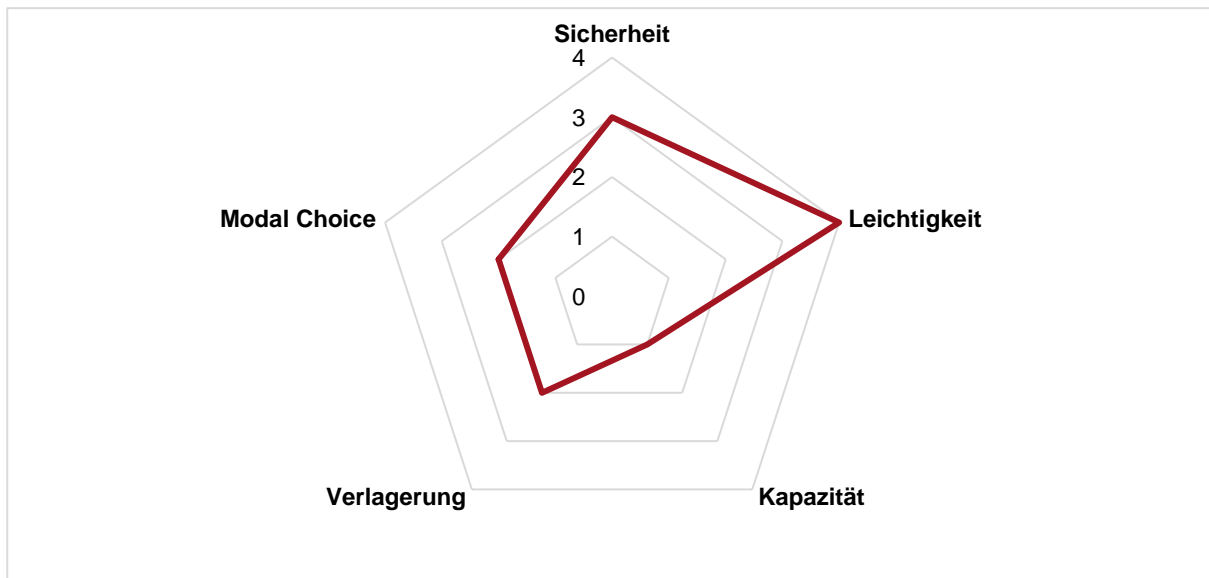


Abbildung 26: Auswirkungen Zuflussregelung

2.5.5 Dynamische Straßennutzungsgebühren

Dynamische Straßennutzungsgebühren sind eine klassische Push-Maßnahme. Durch variable Kostensätze sollen die Verkehrsteilnehmer zu alternativen Fahrzeiten bewegt werden, um die Verkehrsbelastung zu Stoßzeiten zu reduzieren sowie Fahrgemeinschaften und der ÖPNV gestärkt werden.

Die nachfolgend vorgenommene Bewertung der Auswirkungen von dynamischen Straßennutzungsgebühren, welche in Abbildung 27 dargestellt sind, erfolgt anhand eigener Erkenntnisse sowie (Cornago et al. 2019; Zhang et al. 2018).

Die dynamischen Straßennutzungsgebühren haben keinen generell positiven Einfluss auf die Verkehrssicherheit. Wird nur ein Fahrstreifen mittels Dynamischer Straßennutzungsgebühren gesteuert, wird die Verkehrsmenge auf diesem Fahrstreifen optimiert, was auch positive Effekte auf die Verkehrssicherheit hat. Allerdings führt dies in der Regel zu einer noch höheren Verkehrsdichte auf den verbleibenden Fahrstreifen, mit den bekannten negativen Auswirkungen auf das Sicherheitsniveau. Zudem kommt es im Bereich der Anschlussstellen sowie an Anfang und Ende der Managed Lane zu zusätzlichen Verflechtungsvorgängen. Generell problematisch, insbesondere weniger routinierte Fahrer sowie für Ortsfremde, ist, dass die Kosten für den Sonderfahrstreifen regelmäßig wechseln und somit erst mit einem gewissen Vorlauf zum Beginn des Fahrstreifens angezeigt werden. Dies kann zu einer zeitweiligen Überforderung und damit verbunden riskanten Fahrmanövern einhergehen.

Für die Leichtigkeit des Verkehrs haben dynamische Straßennutzungsgebühren nur geringe Auswirkungen. Auf dem gesteuerten Fahrstreifen wird der Verkehr zwar in einem optimalen Betriebszustand gehalten, geht der Fahrstreifen jedoch zulasten des vorhandenen Querschnitts, sinkt die Verkehrsqualität auf den verbliebenen Fahrstreifen. Lediglich für den Fall, dass der Straßenquerschnitt für den Sonderfahrstreifen um einen Fahrstreifen erweitert wird, hat dies eine positive Wirkung.

Die Kapazität einer Straße wird durch dynamische Straßennutzungsgebühren nicht beeinflusst. Wie bereits bei der Leichtigkeit des Verkehrs, würde lediglich der Anbau eines weiteren Fahrstreifens Auswirkungen auf die Kapazität haben. Geht die Sondernutzungsspur jedoch zulasten des bestehenden Querschnitts, nimmt die Kapazität sogar ab. Auch die vermehrten Verflechtungsvorgänge sowie die verringerte Fahrgeschwindigkeit während der Entscheidungsfindung, ob man die Managed Lane nutzen möchte, tragen negativ zur Kapazität bei.

Dynamische Straßennutzungsgebühren haben ein erhebliches Potenzial zur Verlagerung von Verkehr. Je nach Höhe der Kosten können Verkehre sowohl zeitlich verdrängt werden und dadurch die Spitzenstunden entlastet, gleichzeitig kann eine Verlagerung auf andere Strecken, welche nicht oder nur geringer mit einer Maut belastet sind, erfolgen. Zudem wird auch die Verkehrsmittelwahl beeinflusst.

Je höher die Kosten der dynamischen Straßennutzungsgebühren und je größer die Rabatte für privilegierte Fahrzeuge sind, umso stärker sind die Auswirkungen auf die Verkehrsmittelwahl. Die monetäre Komponente zählt zu den wichtigsten Einflussfaktoren, wenn es um die Fahrmittelwahl geht. Somit können Fahrgemeinschaften oder der ÖPNV gezielt gefördert werden. Voraussetzung, insbesondere für den ÖPNV, ist jedoch das Vorhandensein der notwendigen Infrastruktur sowie von Parkplätzen für Fahrgemeinschaften.

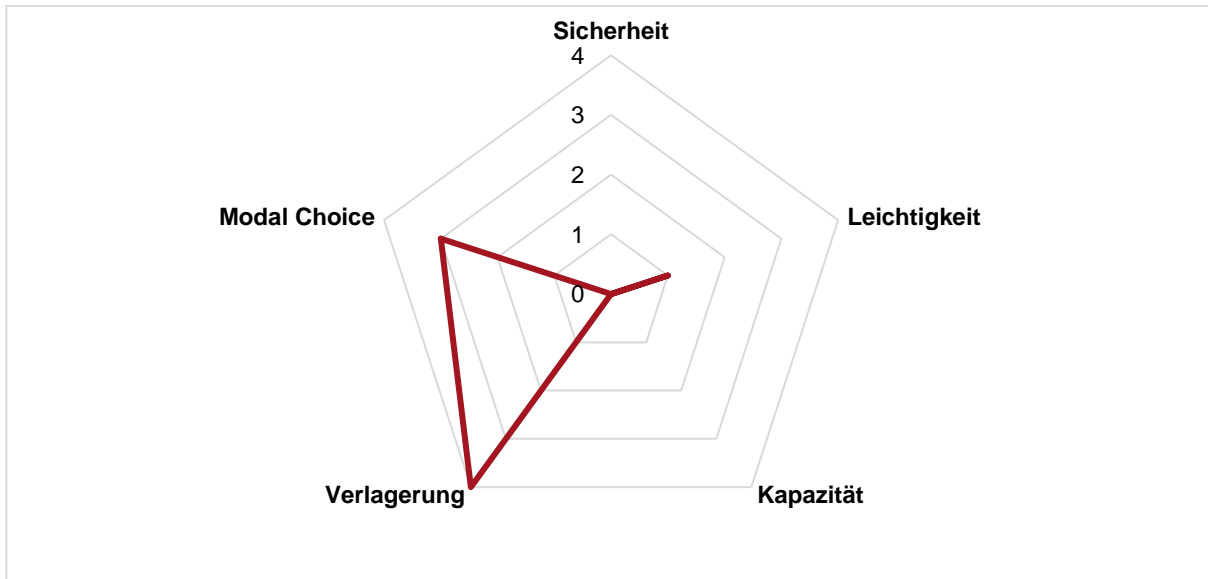


Abbildung 27: Auswirkungen dynamischer Straßennutzungsgebühren

2.6 Umsetzungsgrade von Managed Lanes in Europa

Der Anwendung von Managed Lanes ist regional sehr unterschiedlich. Einen guten Überblick über die konkreten Umsetzungsgrade bietet die Veröffentlichung von (Schönhofer und Bogenberger 2022), aus der auch Abbildung 28 entnommen ist. Dort ist deutlich zu erkennen, dass der Einsatz von Managed Lanes tendenziell von West nach Ost und von Nord nach Süd abnimmt. Insbesondere in Frankreich, Großbritannien, Spanien, den Benelux-Staaten sowie Deutschland und Norwegen kommen unterschiedliche Systeme in einem größeren Umfang zum Einsatz. Allerdings sind solche allgemeinen Aussagen stets mit Vorsicht zu genießen, wie am Beispiel Türkei sichtbar ist. Die Metropolregion Istanbul zählt zu den führenden Regionen

in Europa, was den Einsatz von Managed Lanes betrifft. Im restlichen Land sind jedoch maximal rudimentäre Anlagen zur Verkehrssteuerung vorhanden.

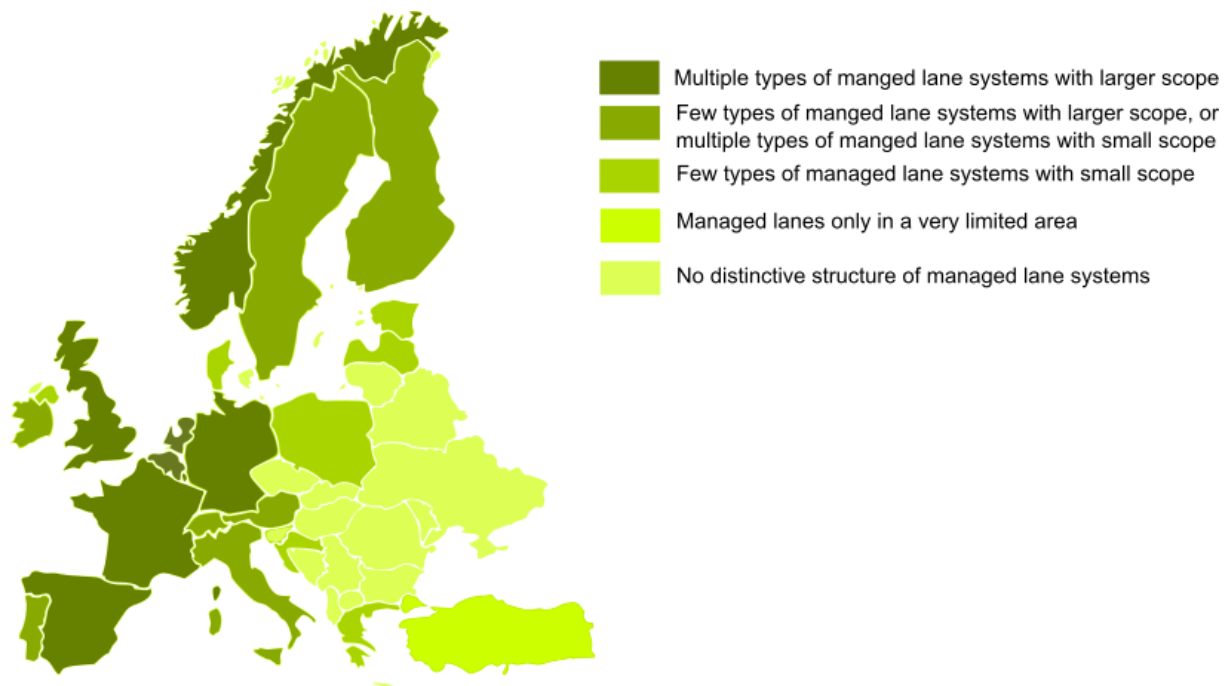


Abbildung 28: Umsetzungsgrade von Managed Lanes in Europa (Schönhofer und Bogenberger 2022)

Die absoluten und relativen Werte der einzelnen europäischen Länder sowie der USA und dreier ausgewählter Bundesstaaten sind nachfolgend in Tabelle 2 aufgelistet. Bezogen auf den Anteil am Autobahnnetz weisen die Niederlande, gefolgt von Litauen, den mit Abstand größten Wert an Managed Lanes auf. Dort ist rund jeder fünfte bis sechste Autobahnkilometer Teil einer aktiven verkehrstechnischen Maßnahme. Auch in absoluten Zahlen sind die Niederlande mit über 500 km an gesteuerten Strecken führend in Europa. Hier folgt Deutschland mit gut 400 km auf dem zweiten Platz, was aufgrund der großen Gesamtlänge jedoch nur einem Anteil von 3 % entspricht.

Tabelle 2: Umsetzungsgrad Managed Lanes Europa und USA Stand 2020 nach (Schönhofer und Bogenberger 2022; Eurostat 2021)

Land	Länge der Autobahnen [km]	Anteil an Managed Lanes [km / %]	Land	Länge der Autobahnen [km]	Anteil an Managed Lanes [km / %]
Belgien	1.763	>17 km* / >1 %*	Niederlande	2.790	533 km / 19 %
Bulgarien	790	0 km / 0 %	Österreich	1.749	23 km / 1 %
Tschechien	1.276	0 km / 0 %	Polen	1.676	0 km / 0 %
Dänemark	1.329	2 km / 0 %	Portugal	3.065	0 km / 0 %
Deutschland	13.183	414 km / 3 %	Rumänien	866	0 km / 0 %
Estland	161	0 km / 0 %	Slowenien	623	0 km / 0 %
Irland	995	0 km / 0 %	Slowakei	495	0 km / 0 %
Griechenland	2.320	0 km / 0 %	Finnland	923	0 km / 0 %
Spanien	15.585	20 km / 1 %	Schweden	2.133	27 km / 1 %
Frankreich	11.671	67 km / 1 %	Island	0	0 km / 0 %
Kroatien	1.310	0 km / 0 %	Liechtenstein	0	0 km / 0 %
Italien	6.966	0 km / 0 %	Norwegen	1.008	7 km / 1 %
Zypern	257	0 km / 0 %	Schweiz	1.462	22 km / 2 %
Lettland	0	0 km / 0 %	Großbritannien	3.838	105 km / 3 %
Litauen	403	57 km / 14 %	Nord Mazedonien	335	0 km / 0 %
Luxemburg	165	7 km / 4 %	Serbien	963	0 km / 0 %
Ungarn	2.076	0 km / 0 %	Türkei	3.060	50 km / 2 %
Malta	0	0 km / 0 %	Kosovo	137	0 km / 0 %
USA	501.554**	49.603 km / 9 %	Texas	39.139	4.686 km / 12 %
Florida	19.864	5.544 km / 28 %	New York	20.297	4.188 km / 21 %

*Gesamtlänge nicht erfasst, ** Daten aus 2019

Betrachtet man die einzelnen Arten von Managed Lanes, zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen und den lokalen Einsatzschwerpunkten.

Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge zählen zu den Standardelementen der Verkehrssteuerung in den USA. In Europa hingegen übersteigt die Länge solcher HOV-Lanes bis heute in keinem Land die Marke von 50 km. Mitte der 1990er sowie Ende der 2000er gab es zwei Wellen mit Pilotprojekten, von denen einige scheiterten. Der Schwerpunkt von Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge liegt in Europa in Norwegen sowie Großbritannien und hier auch eher im innerstädtischen Raum. (Schönhofer und Bogenberger 2022)

Eine weitere, in den USA sehr populäre Art der Managed Lanes, die sich in Europa bisher für den dauerhaften Gebrauch nicht durchsetzen konnte, sind die Wechselverkehrsstreifen. Nach ersten Pilotprojekten in Großbritannien in den 1970er-Jahren dauerte es bis in die 2000er, bis in Frankreich und Spanien kürzere Strecken für Wechselverkehr umgerüstet wurden. Größere Streckenabschnitte gibt es heute neben Großbritannien insbesondere in Istanbul, im städtischen Umfeld. Wechselverkehrsstreifen kommen jedoch in mehreren Ländern im Bereich von verengten Streckenabschnitten im Rahmen von Baustellen vor, beispielsweise in Deutschland. Dazu sind sie häufig Teil von Evakuierungskonzepten und Verkehrsplanungen bei Großereignissen. (Schönhofer und Bogenberger 2022)

Die Temporäre Seitenstreifenfreigabe (TSF) wurde in Deutschland entwickelt und erstmals 1996 auf einer Autobahn eingesetzt. Nach erfolgreichen Pilotprojekten kommt das System heute auf größeren Streckenabschnitten in Deutschland, England, Frankreich sowie Belgien und den Niederlanden zum Einsatz. Insbesondere im Rahmen des ITS Projekts der EU konnte eine größere Menge an Projekten realisiert werden. Der geringe Platzbedarf sowie die relativ schnelle Realisierbarkeit machen die temporäre Seitenstreifenfreigabe insbesondere an Engstellen im urbanen Raum zu einer häufig gewählten Maßnahme. (Schönhofer und Bogenberger 2022)

In den USA ist die (dynamische) Zuflussregelung seit den 1960er-Jahren ein Standardwerkzeug der Verkehrstechnik. In Europa dauerte es bis in die 1980er-Jahre hinein, bis erste Pilotprojekte realisiert wurden und nochmals bis in die 1990er-Jahre, bis sich die Maßnahme etablieren konnte und großräumig zum Einsatz kommt. Schwerpunkte in Europa bilden neben Großbritannien, vorwiegend Frankreich mit der Metropolregion Paris sowie das Ruhrgebiet in Deutschland. Die Zuflussregelung gewann speziell mit der Weiterentwicklung von statischen Schaltplänen an den Rampen hin zu dynamischen, in Echtzeit gesteuerten Systemen an Bedeutung in Europa. (Schönhofer und Bogenberger 2022)

Dynamische Straßennutzungsgebühren kamen erstmals 1975 in Singapur zum Einsatz. Seit Ende der 1990er kamen weitere Projekte in den USA hinzu sowie 2003 in London und 2006 in Stockholm erste europäische Projekte (FHWA 2008). Je nach Definition wird auch das in Deutschland verwendete System zur Erhebung der LKW-Maut als dynamische Straßennutzungsgebühr klassifiziert, auch wenn die Preise hier über den Tagesverlauf konstant sind (RUIDISCH et al. 2005). Aktuell kommen in Europa Systeme mit dynamischen Straßennutzungsgebühren vorwiegend innerorts in Metropolen zum Einsatz, während sie beispielsweise in den USA zur großräumigen Verkehrssteuerung in urbanen Regionen verwendet werden.

2.7 Rahmenbedingungen von Managed Lanes in Europa und Deutschland

Das Verkehrsrecht liegt in Europa in der Hoheit der einzelnen Nationalstaaten, sodass keine einheitlichen rechtlichen Grundlagen für Managed Lanes existieren. Die EU versucht seit 2010 mit der „Intelligente Verkehrssysteme Richtlinie“ (englisch Intelligent Transport Systems (ITS)), welche zwingend Eingang in die nationalen Gesetzgebungen finden muss, einen Rahmen für einheitliche und kompatible Verkehrssysteme in Europa zu schaffen (Europäische Union 07/2010). Die Ziele der Richtlinie werden als „vorrangige Bereiche“ bezeichnet und umfassen:

- die optimale Nutzung von Straßen-, Verkehrs- und Reisedaten,
- die Kontinuität der Dienste Intelligenter Verkehrssysteme in den Bereichen Verkehrs- und Frachtmanagement,
- die Anwendungen Intelligenter Verkehrssysteme für die Straßenverkehrssicherheit sowie
- die Verbindung zwischen Fahrzeug und Verkehrsinfrastruktur (Europäische Union 07/2010)

Eine Reihe von Managed Lane Systemen werden von der ITS aufgegriffen, dazu zählen die Seitenstreifenfreigabe, die Zuflussregelung sowie dynamische Verkehrsbeeinflussungsanlagen, welche für dynamische Geschwindigkeitsbegrenzungen und Streckeninformationsdienste benötigt werden.

In den einzelnen europäischen Staaten gibt es unterschiedliche Herangehensweisen an das Thema Managed Lanes. Diese hängen davon ab, welche Systeme im jeweiligen Land zum Einsatz kommen und welchem Rechtskreis sowie welcher exekutiven Tradition sich die einzelnen Staaten verpflichtet fühlen. Zentrales Element in allen Ländern sind die Verkehrsgesetze, unter anderem der „Code de la route“ in Frankreich (Code de la route 2022) oder das „Prawo o ruchu drogowym“ in Polen (Prawo o ruchu drogowym 2022). Die Handhabung der einzelnen Systeme variiert mitunter sogar innerhalb der einzelnen Staaten. In Österreich werden etwa Fahrstreifen für mehrfach besetzte Fahrzeuge mittels der „RVS 02.04.13: Sonderfahrstreifen für mehrfach besetzte Kraftfahrzeuge und Fahrgemeinschaften“ geregelt (Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr 2006), welche nur einen empfehlenden Charakter hat und keine verpflichtende gesetzliche Regelung darstellt. Daneben existieren jedoch ein Kraftfahrzeuggesetz sowie eine Straßenverkehrsordnung, welche jedoch keine Aussagen zu diesem Thema treffen (Nedbal-Bures und Pürstl 2019), aber dafür die temporäre Pannestreifenfreigabe (in Deutschland TSF) beinhalten.

In Deutschland hat die Gesetzgebung erst partiell auf die Managed Lanes reagiert. Das deutsche Verkehrsrecht bietet aktuell beispielsweise keine Möglichkeiten, Fahrgemeinschaften oder HOV/HOT-Lanes zu priorisieren. Wie bereits in Kapitel 2.3.1 dargestellt, beinhalten die StVO, der VzKat sowie das StVG aktuell kein Verkehrszeichen für Fahrgemeinschaften. Dies macht es allein aus praktischen Gründen unmöglich, einen

Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge auszuweisen. Zudem werden Fahrgemeinschaften weder in der StVO noch im StVG als privilegierte Verkehrsteilnehmer erwähnt, was neben der faktischen Unmöglichkeit noch zu einer fehlenden Rechtsgrundlage führt. Über die Gründe, wieso ein solches Verkehrszeichen in der zurückgezogenen Novelle von StVO und StVG enthalten war, in der fortgeschriebenen Novelle ein Jahr später jedoch nicht mehr, sind unbekannt. Dies ist jedoch durchaus als Indiz für ein bestenfalls mäßiges Interesse der Legislative an Managed Lanes zu werten. Dass entsprechende Gesetze und Verordnung zur Priorisierung effizienter Verkehrssysteme machbar sind, zeigt unter anderem das „Gesetz zur Bevorrechtigung des Carsharing (CsgG)“ aus dem Jahr 2017 (Bundesministerium der Justiz 07/2021). Dieses ermöglicht den zuständigen Kommunen Carsharing-Angeboten in gewissem Umfang Bevorrechtigungen einzuräumen. Auch beim Thema dynamische Streckenbeeinflussungsanlagen hat Deutschland bereits hohen Umsetzungsgrad erreicht. Derzeit sind gut 30 % der Strecken mit solchen Anlagen ausgestattet, welche kurzfristig auf die Gegebenheiten des Verkehrs reagieren können und massiv zur Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs beitragen (Kress et al. 2017).

Obwohl in Deutschland derzeit keine Maut für PKW auf Bundesfernstraßen erhoben wird, sind die gesetzlichen Rahmenbedingungen hierfür vorhanden. Diese werden unter anderem in der EU-Richtlinie 2022/362 gelegt (Europäisches Parlament 02/2022). Das Gesetz über die Erhebung einer zeitbezogenen Infrastrukturabgabe für die Benutzung von Bundesfernstraßen (InfrAG) aus dem Jahr 2015 greift die Rahmengesetzgebung der EU auf und ermöglicht die Erhebung einer Abgabe für die Benutzung von Bundesfernstraßen. Das Gesetz sieht bereits heute für unterschiedliche Emissionsklassen verschiedene Gebührensätze vor und privilegiert dabei emissionsarme Fahrzeuge. Durch geringe Anpassungen am Gesetz wären hier auch die Privilegierung von Fahrgemeinschaften oder anderer Nutzergruppen möglich. (Bundesministerium der Justiz 11/2019) Aufgrund eines Urteils des Europäischen Gerichtshofs kommt das InfrAG derzeit nicht zur Anwendung (Deutscher Bundestag Verwaltung - Referat PE 2 07/2019). Dies wäre jedoch bei einer Novellierung des Gesetzes mit einer Anpassung des Gesetzesrahmens jedoch heilbar.

Ein weiteres mögliches Hindernis bei der Implementierung von Managed Lanes stellt der Datenschutz dar, welcher insbesondere durch die Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) nochmals verschärft wurde. Die zentrale Frage hier ist, ob die dauerhafte Überwachung von Managed Lanes, beispielsweise zur Einhaltung des Besetzungsgrads, rechtmäßig ist. Untersuchungen aus den USA zeigen, dass eine unzureichende Kontrolle der Managed Lanes zu einer Fehlnutzung von 50 % und mehr führen kann, während bei regelmäßiger oder dauerhafter Kontrolle der Anteil auf etwa 3 % sinkt (Fitzpatrick et al. 2016). Dies hat sich auch im Rahmen des Verkehrsversuchs „Blue Lane“ im Rahmen der IAA 2021 gezeigt. Da bereits im Vorfeld angekündigt wurde, keine Sanktionen im Falle einer Fehlnutzung zu verhängen, lag diese nach Einschätzung der Projektbeteiligten über 50 %, ohne dass dies jedoch wissenschaftlich bestätigt werden kann. Zur Kontrolle von Fahrgeschwindigkeiten herrscht in Deutschland Einigkeit, dass Art.2 Abs. 2 DSGVO einschlägig ist, dass Bildaufnahmen zur Dokumentation und Verfolgung von Verstößen gegen Verkehrsregeln gemacht werden dürfen,

also Bilder zu Beweis Zwecken einer beispielsweise überhöhten Geschwindigkeit erstellt werden dürfen. Es scheint nicht abwegig, dass diese Rechtsnorm auch für die Kontrolle von Managed Lanes herangezogen werden kann. Dies ist bislang jedoch nicht rechtskräftig entschieden.

2.8 Zusammenfassung Sonderfahrstreifen

Im vorangegangenen Kapitel wurde der aktuelle Stand der Technik bei Managed Lanes, zu Deutsch Sonderfahrstreifen, intensiv dargestellt. Dabei wurden neben der Geschichte und den Grundlagen von Managed Lanes fünf Systeme intensiver betrachtet. Diese waren die Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge, Wechselverkehrsstreifen, temporäre Seitenstreifenfreigabe, Zuflussregelung und dynamische Straßennutzungsgebühren. Für diese Systeme wurden die Steuerungslogiken, die Auswirkungen, Umsetzungsgrade und die Rahmenbedingungen genauer untersucht. Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass in vielen Ländern bereits eine oder mehrere Technologien aus dem Themenfeld der Managed Lanes zum Einsatz kommen. Allerdings schöpft bislang kein Land die Möglichkeiten komplett aus. Es ist jedoch zu beobachten, dass sich regional unterschiedliche Schwerpunkte herausgebildet haben. Somit gibt es in allen Ländern noch erhebliche Potenziale zur Verkehrsflussoptimierung durch die Verwendung von Sonderfahrstreifen.

In Deutschland kommen aktuell von den genannten Technologien hauptsächlich die Seitenstreifenfreigabe sowie in begrenztem Umfang die Zuflussdosierung und in Baustellenbereichen Wechselverkehrsstreifen zum Einsatz sowie die in dieser Arbeit nicht näher beschriebenen dynamischen Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Hierzu gibt es bereits vielfältige Forschung und Erkenntnisse aus dem laufenden Betrieb. Zu den bislang in Deutschland noch nicht vertretenen Systemen der Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge und den dynamischen Straßennutzungsgebühren gibt es keine oder nur in untergeordnetem Maße Forschungsergebnisse. Hier zeigen sich vielfältige Forschungsfragen, so dass diese Arbeit hier ansetzt.

Auf Grundlage der oben gewonnenen Erkenntnisse sollten Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge in den unterschiedlichen Ausprägungen in Deutschland größere Potenziale aufweisen als rein mit dynamischen Straßennutzungsgebühren belegte Streckenzüge. Deswegen wird im Folgenden der Fokus auf diese Technologie gelegt. Da bei HOV-Lanes immer die Gefahr erheblicher freier Kapazitäten besteht und damit eine geringere Akzeptanz in der öffentlichen Wahrnehmung einhergeht, werden die Fahrstreifen für mehrfachbesetzte Fahrzeuge auf HOT-Lanes konkretisiert. Dort werden die freien Kapazitäten, die bei der Nutzung durch Fahrgemeinschaften und den ÖPNV verbleiben, zahlenden Verkehrsteilnehmern zur Verfügung gestellt und bleiben somit nicht ungenutzt. Um die Wirkweise, Potenziale und Effekte der HOT-Lanes besser verstehen zu können, wurden bereits in Kapitel 1.3 Forschungsfragen formuliert, die in den folgenden Kapiteln beantwortet werden sollen. Hierzu werden zunächst in Kapitel 3 die Grundlagen ermittelt und zwei Ansätze

zur Nachfrageschätzung entwickelt. In den weiteren Kapiteln werden diese mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulationen getestet und die Ergebnisse analysiert und eingeordnet.

3. Entwicklung einer Methodik zur Nachfrageschätzung einer HOT-Lane auf einer deutschen Autobahn

Zentrales Element, um die Potenziale von HOT-Lanes auf deutschen Autobahnen abzuschätzen, ist die Prognose der Nachfrage. Da ein solches Verfahren für Deutschland bislang nicht existiert, wird es im Folgenden entwickelt. Ausgangspunkt ist dabei eine Stated-Preference-Umfrage unter deutschen Pendlern. Die potenzielle Nachfrage wird schließlich aus einer Kombination von Strukturgleichungsmodellen und der multinomialen logistischen Regression ermittelt.

3.1 Grundlagen

Da es sich bei der HOT-Lane um ein neues, in Deutschland und dem benachbarten Ausland bislang nicht erprobtes System handelt, muss zunächst die Einstellung der Verkehrsteilnehmer hierzu abgefragt und die geeigneten Parameter ermittelt werden.

3.1.1 Umfrage zu Potenzialen einer Managed Lane

Zur Erhebung von Ausgangsdaten für die Modellierung der Nachfrage für eine Managed Lane auf einer deutschen Autobahn wurde im zweiten Quartal 2022 eine Umfrage durchgeführt. Der Zugangslink wurde sowohl über die Webseite des Lehrstuhls für Verkehrstechnik der TU München und im Umfeld des Lehrstuhls verteilt als auch über verschiedene Angebote des Meta Konzerns wie Facebook und Instagram sowie LinkedIn gebührenpflichtig beworben. Eine erste Auswertung der Daten erfolgte im Rahmen eines Beitrags zur TRB 2023 durch Schönhofer, Kaltenhäuser und Bogenberger (Schönhofer et al. 2023a). Neben klassischen Verfahren zur statistischen Auswertung von Umfragedaten, wie deskriptiver Statistik, ANOVA-Analysen oder Kreuztabellierung, wurde auch die Strukturgleichungsmodellierung eingesetzt.

Ergebnisse aus deskriptiven statistischen Verfahren

Die Umfrage lief rund 3 Monate. In dieser Zeit nahmen 212 Personen daran teil, davon ordneten sich 111 Personen dem weiblichen Geschlecht zu, 101 gaben an, männlich zu sein. Abbildung 29 zeigt die Altersverteilung der Umfrageteilnehmer. Dabei ist deutlich ersichtlich, dass die Gruppe der 21- bis 30-jährigen mit Abstand am häufigsten an der Umfrage teilgenommen hat, gefolgt von den 31- bis 40-jährigen. Hierfür gibt es eine Reihe von Gründen. Die sozialen Netzwerke LinkedIn und Instagram werden überproportional stark von Menschen unter 40 Jahren genutzt (Statista 2022b, 2022c). Die Nutzergruppen von Facebook sind tendenziell etwas älter, doch auch hier ist der Altersschnitt unter 60 Jahren (Statista 2022a). Zudem nimmt die Strecke, welche Pendler täglich zurücklegen, tendenziell mit zunehmendem Alter ab (Information und Technik Nordrhein-Westfalen 2014), wohingegen sich die Umfrage explizit an Pendler richtete. Auch wenn von der vorliegenden Altersverteilung von einer

gewissen Beeinflussung der Ergebnisse ausgegangen werden muss, sind sich die Autoren der Umfrage dennoch einig, dass die Daten noch als repräsentativ angesehen werden können.

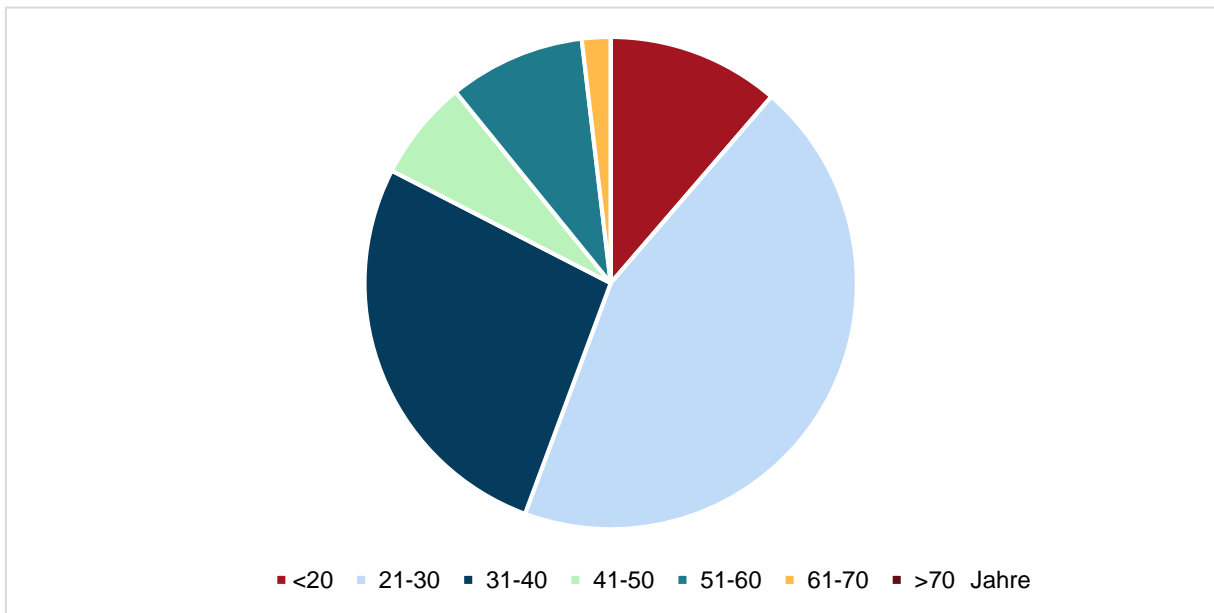


Abbildung 29: Altersverteilung Umfrage

Überraschend waren die Antworten auf die Frage, wie die Umfrageteilnehmer ihr Haushaltseinkommen im deutschen Durchschnitt bewerten würden. Wie in Abbildung 30 ersichtlich ist, geben knapp die Hälfte aller Befragten an, über ein durchschnittliches Einkommen zu verfügen. Mehr als jeder Dritte bewertete hingegen sein Gehalt als überdurchschnittlich, was deutlich über dem deutschen Durchschnittswerten liegt (Bundeszentrale für politische Bildung 2022). In anderen Studien, beispielsweise bei (Dauth und Haller 2018) zeigte sich, dass die Pendeldistanzen mit zunehmendem Bildungsgrad ansteigen und bei Akademikern am größten sind. Zusätzlich sinkt die Zahl der verfügbaren Arbeitsplätze mit steigendem Einkommen, wodurch längere Strecken in Anspruch genommen werden, wobei diese Stellen oft mit einem hohen Bildungsgrad einhergehen. Zudem wurde in der vorliegenden Umfrage nur nach einer subjektiven Einordnung des Einkommens gefragt und keine Absolutwerte als Referenz angegeben. Aus diesem Grund kann es sein, dass zwei Menschen mit demselben Einkommen sich unterschiedlichen Einkommensstufen zuordnen. Dieses Vorgehen bietet den Vorteil, dass die subjektive Empfindung des eigenen Einkommens, welche Auswirkungen auf das Handeln hat, abgebildet wird. Es ist zudem möglich, dass durch die Verteilung, unter anderem über das Karrierenetzwerk LinkedIn, insbesondere überdurchschnittlich verdienende Menschen angesprochen wurden, welche diese Form der sozialen Netzwerke überdurchschnittlich nutzen. Möglicherweise spielt auch eine Rolle, dass manche Menschen ein unterdurchschnittliches Einkommen nur ungern zugeben oder falsche Referenzwerte zur Beurteilung herangezogen werden, da zum Zeitpunkt der Umfrage eine relativ prominent geführte Debatte zur Anhebung der Mindestlöhne stattfand.

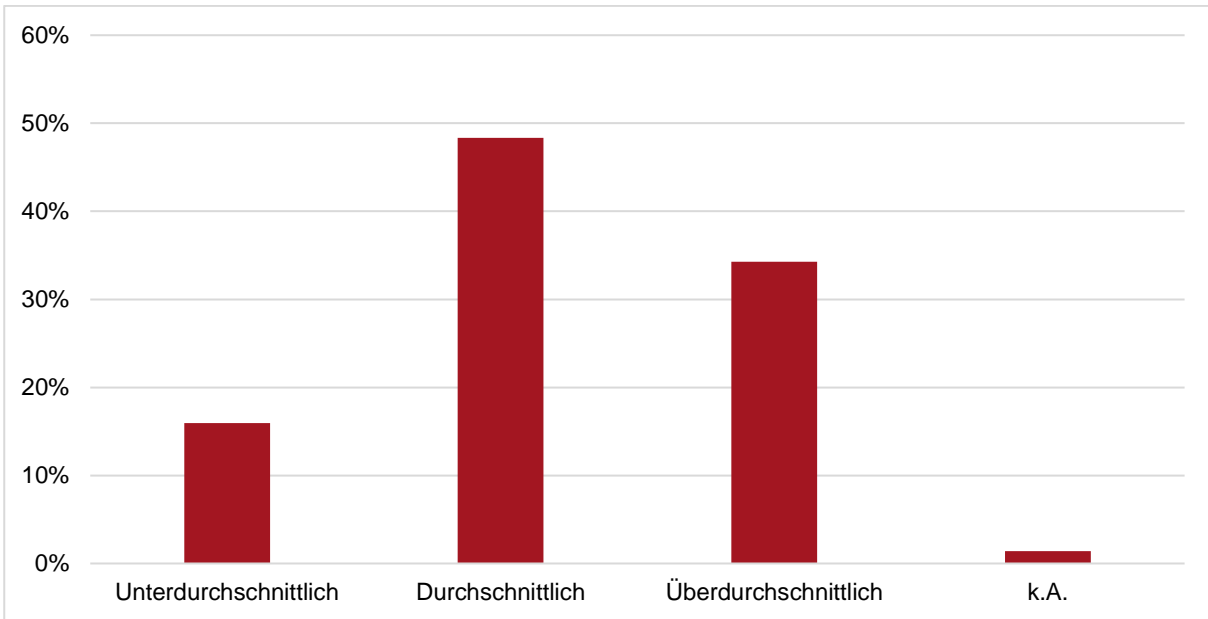


Abbildung 30: Einkommensstruktur der Umfrageteilnehmer

Bei der Frage nach ihrem Wohnort und ihrer Arbeitsstelle wurden die Teilnehmer gebeten, diese den Gebietskategorien „Ländlich“, was mit Orten mit weniger als 15.000 Einwohnern beschrieben war, „Vorort“ also Mittelstädten mit 15.000 – 60.000 Einwohnern oder „Urban“ womit Städte mit mehr als 60.000 klassifiziert wurden, zuzuordnen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 31 dargestellt. Beinahe die Hälfte der Befragten gab an, ländlich zu leben, während aber nur knapp jeder vierte auch seinen Arbeitsplatz in einem ländlichen Umfeld hat. Die ländlichen Gebiete haben also ein negatives Pendlersaldo, während im Bereich der Vororte sowie im urbanen Raum mehr Menschen arbeiten als leben. Diese Unterschiede von Wohnort und Arbeitsstelle sind der Ausgangspunkt für die täglichen Pendelbewegungen.

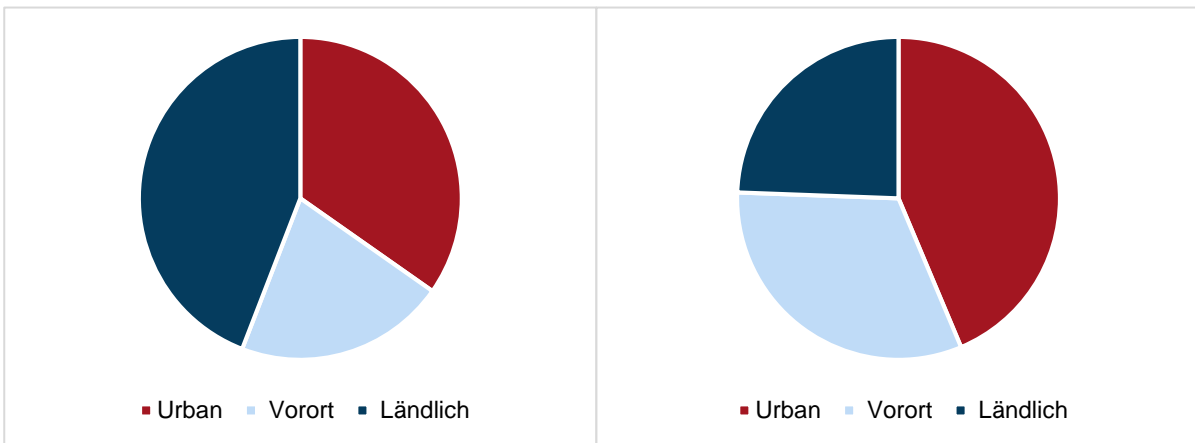


Abbildung 31: Wohnorte (links) und Arbeitsorte (rechts) der Befragten

Eng mit der Lage von Wohn- und Arbeitsort verbunden sind auch die Aussagen, ob der Arbeitsort in einer subjektiv angemessenen Zeit mit dem ÖPNV erreicht werden kann.

Lediglich 54 % der Befragten bejahten diese Aussage, während für den Rest der ÖPNV keine ernsthafte Alternative darstellt.

Bei den Pendeldistanzen der Umfrageteilnehmer lassen sich drei Gruppen bilden. Rund ein Drittel der Befragten legt täglich auf ihrem Arbeitsweg eine Strecke zwischen 0 und 10 km zurück. Ein weiteres Drittel ist zwischen 10 und 30 km unterwegs, während das verbleibende Drittel mehr als 30 km Abstand zwischen Arbeits- und Wohnort hat. Die genaue Verteilung ist in Abbildung 32 abgebildet. Die hier ermittelten Werte weichen von den Zahlen des Mikrozensus 2020 ab. Dort legen mit 49,8 % rund die Hälfte der Befragten weniger als 10 km pro Pendelstrecke zurück, während erneut rund ein Drittel zwischen 10 und 30 km unterwegs waren und nur etwa 15 % gaben dort an, einen mehr als 30 km langen Arbeitsweg zu haben (Statistisches Bundesamt 2022). Die Unterschiede zwischen den Datensätzen liegen darin, dass sich die Umfrage explizit an „Pendler“ gewendet hat, während der Mikrozensus einen repräsentativen Querschnitt durch die Gesellschaft abbilden soll. Viele Menschen mit kurzem Arbeitsweg würden sich selbst jedoch nicht als Pendler beschreiben und fühlten sich von der Umfrage der TU München nicht angesprochen. Für die Aussagekraft der Untersuchung hat diese Verzerrung keinen Einfluss, da Managed Lanes auf Autobahnen insbesondere von Pendlern mit Fahrtstrecken über 10 km genutzt werden.

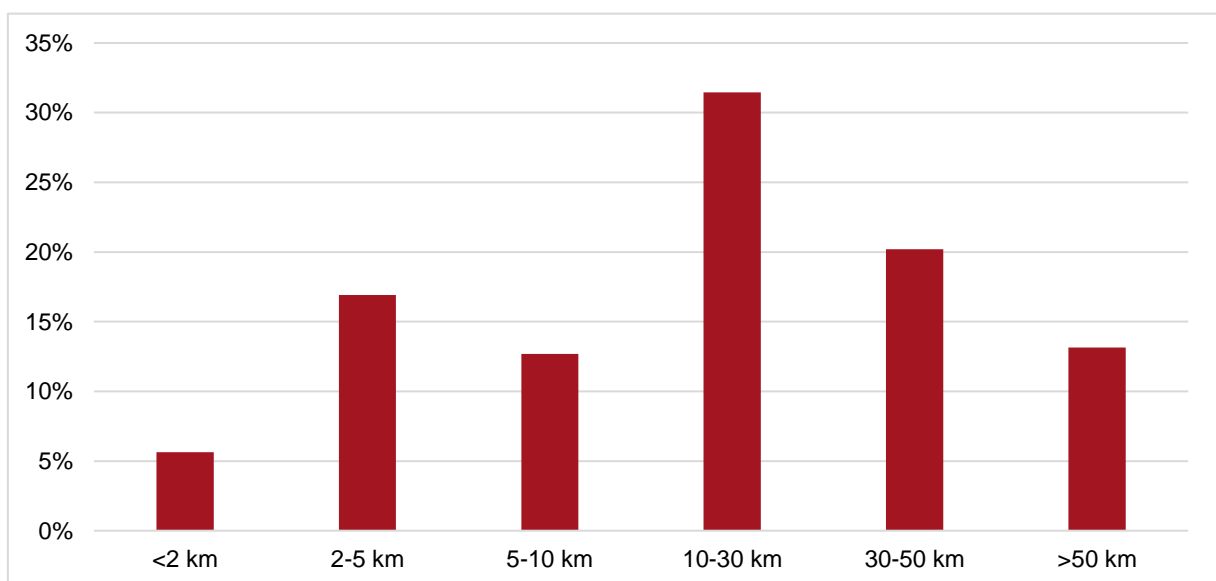


Abbildung 32: Pendeldistanz der Umfrageteilnehmer

Die große Mehrheit der Pendler bewältigt diese Strecken in weniger als einer Stunde. Dabei erreichen 14 % der Befragten ihre Arbeitsstelle sogar in weniger als 10 Minuten, während 19 % zwischen 10 und 20 Minuten für Ihren Weg in die Arbeit benötigen. Die mit je 22 % größten Gruppen sind zwischen 20 und 30 Minuten sowie 30 und 45 Minuten unterwegs. Danach nimmt die Zahl derer, die 45 bis 60 Minuten benötigen, auf 17 % ab, mehr als eine Stunde benötigen dann nur noch 7 % der Befragten.

Betrachtet man die Gruppe derer, die bereits heute zumindest gelegentlich Fahrgemeinschaften nutzen, fällt auf, dass der Anteil mit zunehmender Wegstrecke ansteigt. Speziell für diese Menschen ist die Einrichtung von Sonderfahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge interessant und gewinnbringend. Kombiniert man die Abbildung 32 und Abbildung 33, wird klar, dass die Gruppe der Langstreckenpendler die größten Potenziale für beispielsweise HOV-Lanes haben, während bei der Mittelstrecke noch gewisse Potenziale vorhanden sind und die Kurzstreckenpendler keine relevanten Nutzerzahlen mehr erwarten lassen.

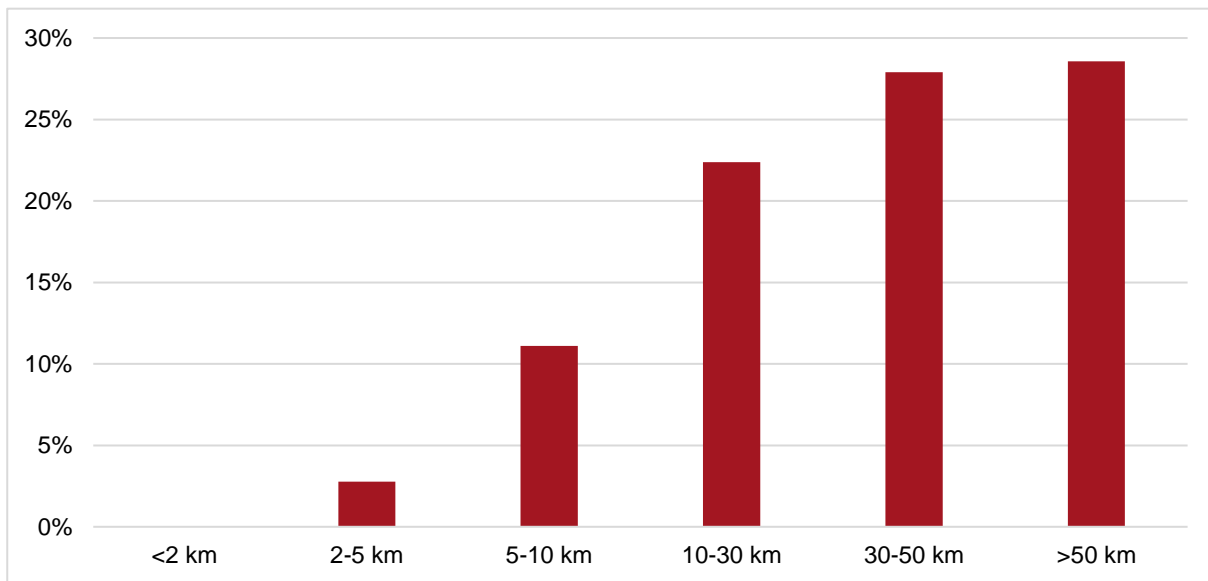


Abbildung 33: Anteil an zumindest gelegentlichen Fahrgemeinschaftsnutzern

Trotz der teilweise hohen Werte in Abbildung 33 nutzen heute lediglich 18 % der befragten Pendler zumindest gelegentlich Fahrgemeinschaften, während diese für 82 % keine Option darstellt. Unter denen, die zumindest gelegentlich eine Fahrgemeinschaft bilden, nutzt der größte Anteil (35 %) Fahrgemeinschaften ein- bis zweimal pro Woche, gefolgt von denen, die täglich (25 %) oder aber nur ein- bis dreimal pro Monat (25 %) nutzen. Wie groß die Potenziale von Fahrgemeinschaften sind, wird daran deutlich, dass sich 90 % aller Befragten zumindest grundsätzlich vorstellen können, eine Fahrgemeinschaft einzugehen, während nur 10 % dies kategorisch ausschlossen. Hierfür erwarten sie jedoch bessere Rahmenbedingungen und „Gegenleistungen“ beispielsweise in Form von finanziellen Vorteilen, Reisezeitgewinnen, wobei die Forderungen teilweise unrealistische Formen, wie eine Halbierung der Reisezeit annahmen. Was in der Auswertung der Daten auffallend war, ist, dass je kürzer die Pendelstrecke der einzelnen Personen war, die heute noch keine Fahrgemeinschaften bilden, um so altruistischer waren diese Personen bei den Forderungen nach persönlichen Vorteilen für das Bilden einer Fahrgemeinschaft. Für sie waren abstrakte Vorteile wie sozio-ökonomische Effekte oder ein Beitrag zum Umweltschutz wichtiger als Zeit und Kosten. Dies ist darin zu begründen, dass die monetären und zeitlichen Reisekosten dieser Gruppe heute bereits sehr gering sind und die Potenziale hier weitestgehend erschöpft. Dies wird im Vergleich zu den Pendlern mit längerer Fahrtstrecke klar, denen insbesondere

Reisezeitgewinne, gefolgt von monetären Entlastungen, vielfach wichtiger waren als abstrakte Vorteile.

Erwartungsgemäß ist der Anteil derer, die eine Fahrgemeinschaft eingehen höher, wenn keine akzeptable ÖPNV-Anbindung vorliegt. In der vorliegenden Untersuchung gaben 24 % der Befragten an, zumindest gelegentlich eine Fahrgemeinschaft einzugehen, wenn sie ihre Arbeitsstelle nicht in einer angemessenen Zeit mit dem ÖPNV erreichen können. Diejenigen, die die Option des ÖPNVs haben, nutzen nur in 14 % mindestens gelegentlich Fahrgemeinschaften. Der Anteil an Fahrgemeinschaften sinkt damit um 42 %, falls eine gute ÖPNV-Anbindung vorhanden ist. Interessanterweise hat die derzeitige Verfügbarkeit von ÖPNV auch Auswirkungen auf die potenzielle künftige Nutzung. Nach einem Szenario befragt, in dem sich die Teilnehmer vorstellen sollen, dass sowohl der ÖPNV als auch Fahrgemeinschaften und Alleinfahrten im PKW sie in einer angemessenen Zeit an ihr Ziel bringen würden, gaben 80 % derer, die bereits heute über eine ÖPNV-Anbindung verfügen an, mindestens einen Tag die Woche den ÖPNV zum Pendeln nutzen zu wollen, während die Teilnehmer, die heute keine angemessene ÖPNV-Anbindung haben nur zu 44 % künftig mindestens einen Tag pro Woche eine ÖPNV-Verbindung nutzen würde. Dies verdeutlicht die große Bedeutung eines gut ausgebauten ÖPNV-Netzes.

Die meisten Menschen (74 %) bevorzugen feste Fahrgemeinschaften, mit bekannten Mitfahrern, auch wenn spontane Fahrgemeinschaften Vorteile hinsichtlich Flexibilität und ggf. Fahrtzeit bieten. Hierbei ist auch ein deutlicher Unterschied zwischen den Geschlechtern feststellbar. Nur 15 % der weiblichen Umfrageteilnehmer können sich flexible Fahrgemeinschaften mit Unbekannten vorstellen, während 85 % feste Fahrgemeinschaften bevorzugen. Bei den Männern waren hingegen 40 % bereit, flexible Fahrgemeinschaften einzugehen, wenn damit entsprechende Vorteile einhergehen. Diese Werte überraschen nicht, da sie das in der Forschung bekannte unterschiedliche Sicherheitsgefühl von Frauen und Männern sowie die Vorliebe für bekannte Strukturen abbilden.

Im Rahmen der Umfrage wurden die Teilnehmer gebeten, die vier Attribute finanzielle Kosten, Reisezeit, Umweltschutz sowie sozio-ökonomische Faktoren in Abhängigkeit zueinander zu wichten. Zu den finanziellen Kosten zählen neben dem direkten Fahrpreis auch Grundkosten, beispielsweise für einen PKW. Die Reisezeit beinhaltet neben der reinen Fahrtzeit auch die Wartezeiten oder regelmäßige Verspätungen. Die Belange des Umweltschutzes spiegeln die Relevanz von Nachhaltigkeitsaspekten und subjektiven Auswirkungen auf das Klima wider. Sozio-ökonomischen Faktoren beinhalten unter anderem das gemeinsame Pendeln mit Freunden, den Status von Verkehrsmitteln oder soziale Stressoren, welche auf ein bestimmtes Handeln drängen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 34 dargestellt. Der Faktor Finanzen ist für die Befragten hier klar am bedeutendsten, gefolgt von der Reisezeit. Diese „harten“ Faktoren waren den Befragten auch umso wichtiger, je länger ihre tägliche Pendeldistanz war. Die „weichen“ Faktoren, welche nur indirekt beim täglichen Weg in die Arbeit greifbar sind, schnitten insbesondere bei Kurzstreckenpendlern besser ab, wobei die sozio-ökonomischen Faktoren insgesamt eine untergeordnete Rolle spielen, während dem Themengebiet

Umweltschutz noch eine größere Relevanz eingeräumt wird. Insgesamt schafften es die drei Themen Finanzen, Reisezeit und Umweltschutz jeweils mehr als 50 % der Stimmen für die Kategorien „Am wichtigsten“ oder „Wichtig“ zu vereinen.

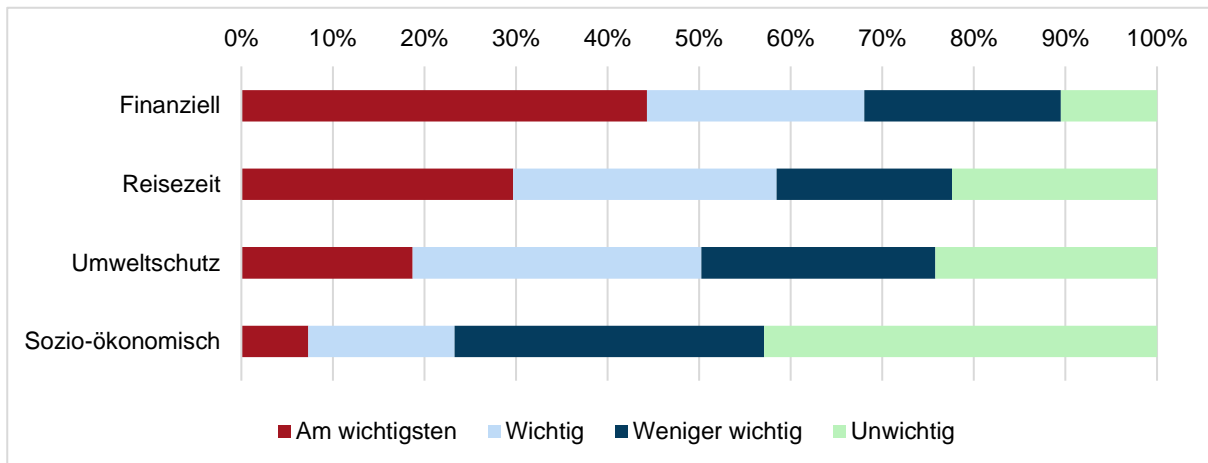


Abbildung 34: Bedeutung ausgewählter Attribute auf das Wahlverhalten beim Pendeln

Erkenntnisse aus der Verkehrsmittelwahl-Analyse

Im Rahmen der Umfrage wurden die Teilnehmer gebeten, im Rahmen vorgegebener Szenarien zu entscheiden, wie viele Tage pro Woche sie sich für welches Verkehrsmittel entscheiden würden. Das Ausgangs-Szenario war dabei jedes Mal gleich. Die Teilnehmer wurden gebeten sich vorzustellen, dass sie für ihren morgendlichen Arbeitsweg derzeit 45 Minuten benötigen, durch eine neue HOT-Lane (Fahrstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge mit der Möglichkeit diesen gegen Bezahlung auch als Alleinfahrer zu nutzen) künftig jedoch die Möglichkeit bestünde, die Reisezeit zu reduzieren. Für die Nutzung der HOT-Lane waren Kosten von 5 € – 20 € angesetzt und die Reisezeit konnte von 45 Min. auf 25 Min. bis 35 Min. reduziert werden. Insgesamt standen folgende Wahlmöglichkeiten zur Verfügung:

- Fahrgemeinschaft, mit reduzierter Fahrtzeit und ohne Maut
- Alleinfahrt im PKW mit Maut und reduzierter Fahrtzeit
- Wechsel auf den vorhandenen ÖPNV mit vergleichbaren Kosten und Reisezeiten wie Fahrgemeinschaften
- Alleinfahrt im PKW, ohne Fahrtzeitverkürzung und ohne Maut

Es zeigte sich deutlich, dass die Bereitschaft für die Nutzung des Sonderfahrstreifens zu bezahlen mit zunehmenden Kosten abnimmt. Gleichzeitig steigt die Zahlungsbereitschaft mit steigenden Reisezeitgewinnen. Dies wird beispielhaft in Abbildung 35 deutlich, wo deutlich zu erkennen ist, wie die Zahlungsbereitschaft bei höheren Preisen und Reisezeiten abnimmt. So fällt der dunkelblaue Pfeil mit steigenden Mautkosten, während die orangen Pfeile mit zunehmenden Reisezeitgewinnen, beziehungsweise geringerer Fahrtzeit abnehmen.

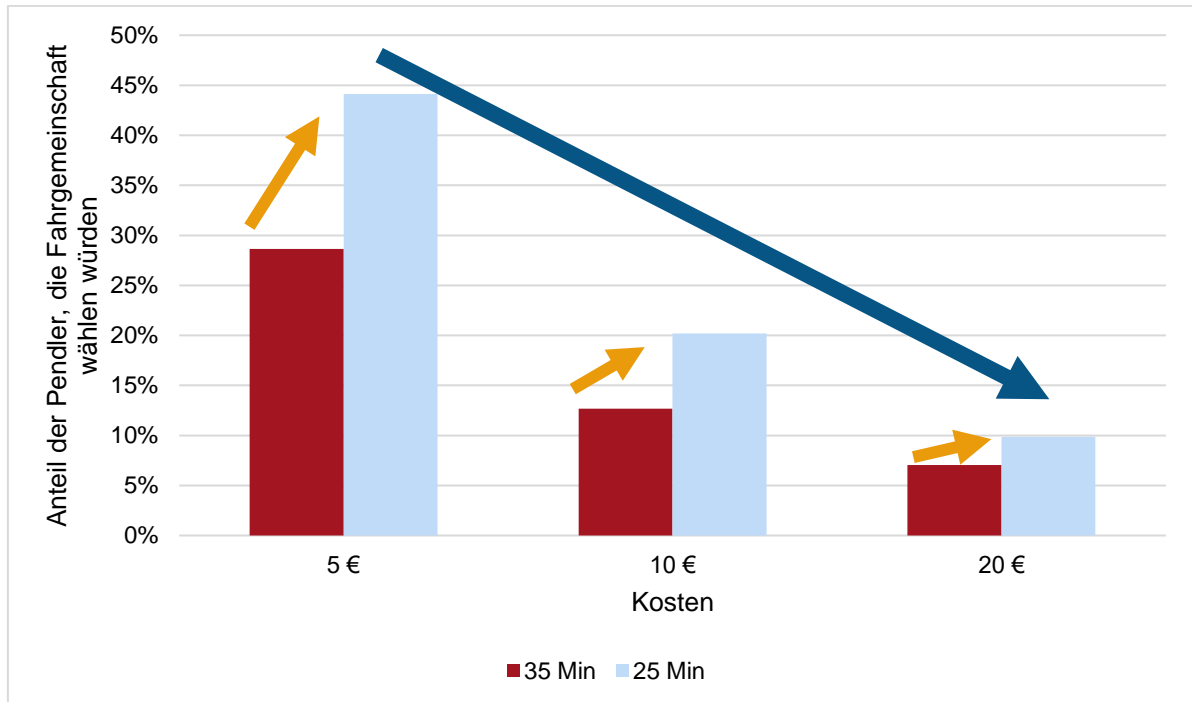


Abbildung 35: Zahlungsbereitschaft in Abhängigkeit von Reisezeit und Kosten

Dabei spielt auch das Einkommen der Verkehrsteilnehmer eine entscheidende Rolle. Abbildung 36 zeigt beispielhaft, wie sich die Zahlungsbereitschaft für Fahrtzeitgewinne von 10 Min. und 20 Min. über die verfügbaren Haushaltseinkommen verteilen. Es zeigt sich deutlich, dass die Zahlungsbereitschaft über alle Einkommensgruppen hinweg mit steigenden Preisen abnehmen. Die Bereitschaft zu bezahlen, ist in der Gruppe der überdurchschnittlich Verdienenden dabei stets deutlich größer als bei den anderen Einkommensgruppen. Diese liegen bei geringen bis mäßigen Mautgebühren beinahe gleichauf, erst bei hohen Mautgebühren zeigen Verkehrsteilnehmer mit durchschnittlichem Einkommen eine deutlich höhere Zahlungsbereitschaft gegenüber Verkehrsteilnehmern mit geringem Einkommen. Teilweise liegen die Werte der Zahlungsbereitschaft bei den unterdurchschnittlichen

Einkommen sogar höher als bei den durchschnittlichen. Dies könnte in längeren Fahrtstrecken oder der in diesem Fall relativ kleinen Referenzgruppe liegen.

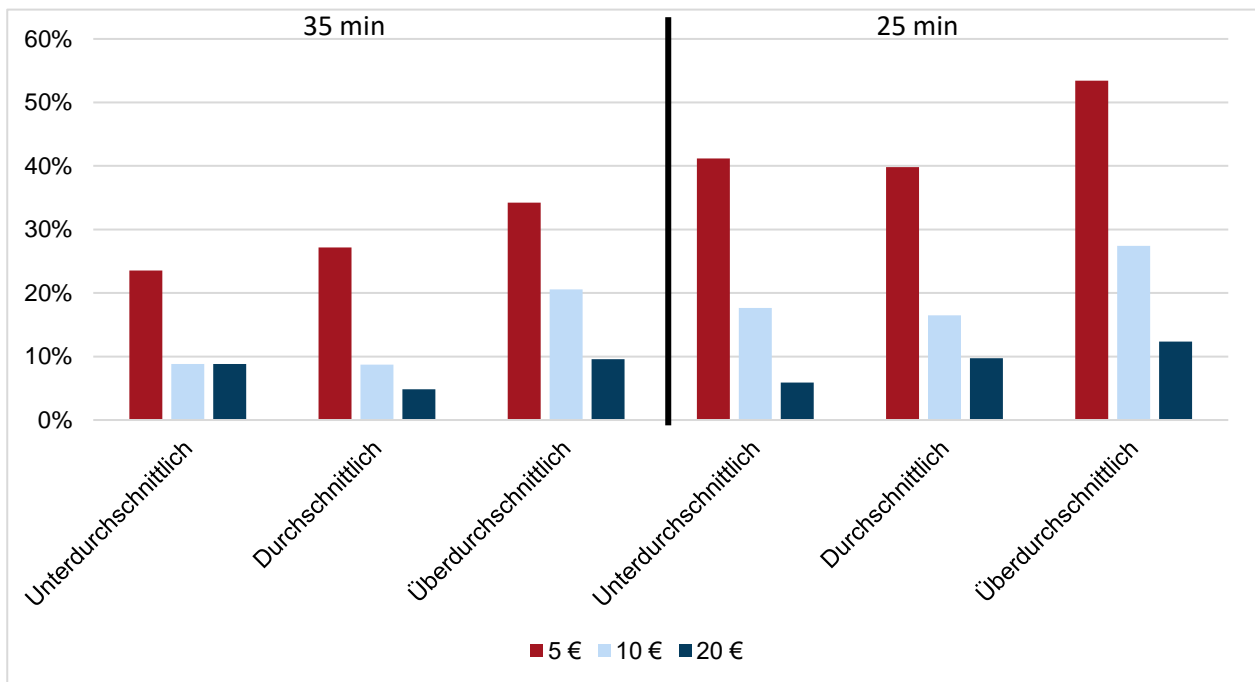


Abbildung 36: Zahlungsbereitschaft in Abhängigkeit des Einkommens

Im Rahmen der Umfrage konnte keine Korrelation zwischen Reisezeit und Kosten mit der Entscheidung für die Nutzung des ÖPNVs festgestellt werden. Die Anzahl an Nutzern blieb über alle Szenarien hinweg konstant und korrespondierte nicht mit steigenden Mautgebühren oder gesunkenen Reisezeiten.

Überraschenderweise war auch die Entscheidung für oder gegen eine Fahrgemeinschaft unabhängig von den Mautkosten und der Fahrzeit. Hier wäre erwartet worden, dass mit einer gesunkenen Reisezeit die Zahl von Fahrgemeinschaften zunimmt. Dies konnte in den Daten jedoch nicht beobachtet werden. Vielmehr ist die Zahl derjenigen, die sich vorstellen können, zumindest gelegentlich auf dem Weg zur Arbeit eine Fahrgemeinschaft zu bilden, unabhängig von der Fahrzeit und Kosten konstant.

Die Bedeutung von Flexibilität und Fahrtkosten ist gegenläufig für die unterschiedlichen Einkommensgruppen. Zwar geben mehr als 50 % der Befragten aller Einkommensgruppen an, dass für sie die Flexibilität wichtig oder sehr wichtig ist, allerdings schwanken diese Anteile von 58 % bei denjenigen mit unterdurchschnittlichem Einkommen bis 73 % bei denen mit hohem Einkommen. Die genaue Verteilung ist in Abbildung 37 dargestellt. Sowohl von bei den durchschnittlichen als auch bei den überdurchschnittlichen Einkommen steigt die Bedeutung der Flexibilität von unwichtig bis wichtig durchgehend an. Demgegenüber halten nur 7 % der wohlhabenderen Haushalte die Fahrtkosten für wichtig, während sie für 28 % sogar weniger wichtig oder unwichtig sind. Bei den unterdurchschnittlichen Einkommen halten hingegen 41 %

die Fahrtkosten für wichtig und nochmals 35 % für eher wichtig und nur 6 % der Befragten gaben hier an, dass die Fahrtkosten für sie unwichtig oder weniger wichtig wären.

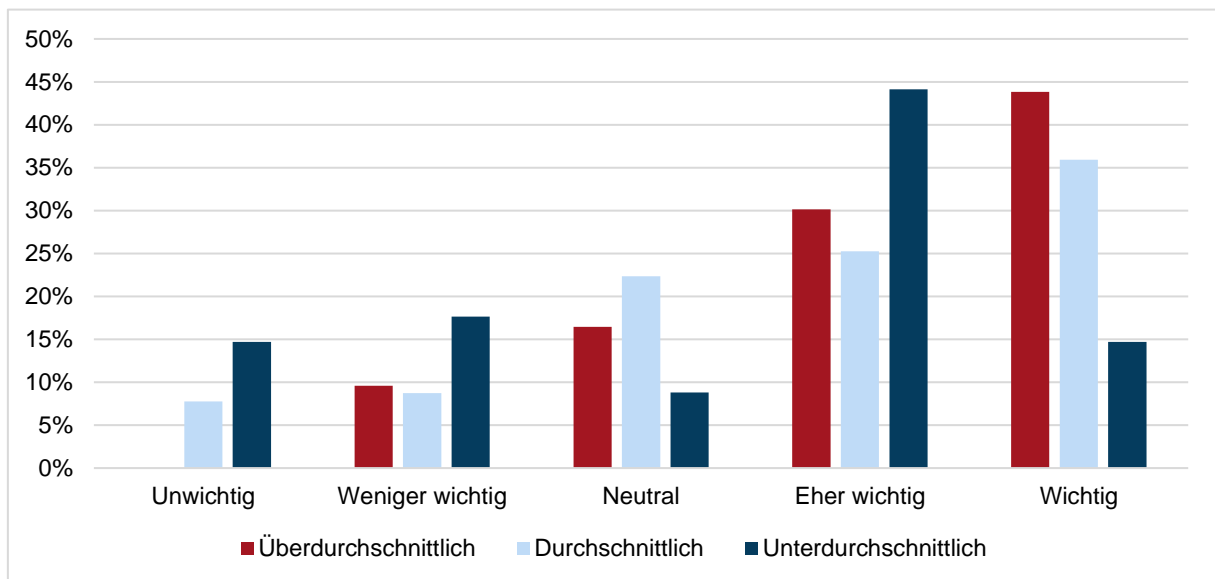


Abbildung 37: Bedeutung Flexibilität in Abhängigkeit des Einkommens

3.1.2 Ergebnisse aus Strukturgleichungsmodellierung

Um neben den klassischen deskriptiven Auswertungen der Umfragedaten auch verdeckte Abhängigkeiten aufzeigen zu können, wurden die Daten auch mittels der Strukturgleichungsmodellierung (SGM) untersucht. Die Strukturgleichungsmodellierung ist ein statistisches Verfahren, welches insbesondere in den Sozialwissenschaften, der Psychologie und den Wirtschaftswissenschaften eine wichtige Rolle spielt. Die Theorie der Strukturgleichungsmodellierung ist sehr komplex und würde bei einer umfassenden Beschreibung in dieser Arbeit unverhältnismäßig viel Raum im Verhältnis zu ihrer Bedeutung bei Formulierung des Nachfragemodells einnehmen. Im Folgenden wird daher nur ein Überblick über das Verfahren gegeben, bevor die praktische Anwendung und Auswertung folgen. Einen guten Überblick über das gesamte Themenfeld der Strukturgleichungsmodellierung bieten unter anderem Civelek (Civelek 2018) sowie Mueller und Hancock (Mueller und Hancock 2018).

Die Strukturgleichungsmodellierung ist eine statistische Methode, die Elemente der Faktor-Analyse sowie der Pfad-Analyse enthält (Weston und Gore 2006). Diese kommen seit über 100 Jahren zum Einsatz und haben sich bei wissenschaftlichen Arbeiten bewährt. Die Faktor-Analyse wurde unter anderem von Spearman zu Beginn des 20. Jahrhunderts entwickelt und Mitte des 20. Jahrhunderts Thurstone und Jöreskog sowie weiteren Wissenschaftlern weiterentwickelt (Tarka 2018). Sie wird verwendet, um Rückschlüsse über latente Variablen aus messbaren Parametern zu ziehen. Die Pfad-Analyse ist etwas jünger und geht hauptsächlich auf Überlegungen von Wright zurück, der Mitte des 20. Jahrhunderts eine Methode zur Beschreibung kausaler Abhängigkeiten entwickeln wollte (Tarka 2018).

Teilweise werden Wrights Pfad-Analysen in der Literatur als erste Generation der SGM bezeichnet (Fan et al. 2016), dies ist in der Fachwelt jedoch umstritten (Tarka 2018). Die zweite Generation der Strukturgleichungsmodelle, welche auch gemeinhin als SGM anerkannt werden, entstanden in den 1970er-Jahren durch die Kombination von Methoden der Pfad-Analyse mit Ansätzen der Faktor-Analyse. Ab den frühen 2000ern entwickelten sich vor dem Hintergrund leistungsfähigerer Rechner die dritte Generation der SGM, welche jetzt auch Bayesian Modellierung sowie des „structural causal model“ ergänzt wird. (Suhr 2006; Fan et al. 2016)

Ein Strukturgleichungsmodell besteht in der Regel aus verschiedenen Teilmodellen, einem inneren Strukturmodell sowie äußeren Messmodellen.

Die Messmodelle bilden die Beziehungen der latenten Variablen zueinander ab. Da jedoch latente Variablen nicht direkt messbar sind, werden ihnen passende empirisch messbare Variablen zugewiesen, um die latenten Variablen möglichst genau abzuschätzen. Bei der Auswahl der Messvariablen ist es jedoch wichtig, dass sie valide Rückschlüsse auf die jeweilige latente Variable zulassen und möglichst direkt mit ihr verknüpft sind. Dies liegt unter anderem daran, dass Messvariablen fehleranfällig sind und Genauigkeitsverluste beinahe unausweichlich sind, wenn eine oder mehrere Messvariablen mit einer latenten Variable verknüpft werden. In Abbildung 38 ist der grundsätzliche schematische Aufbau eines SGM dargestellt. Die x - und y -Werte stehen dort für die Indikatoren der latenten exogenen und endogenen Variablen. Dabei werden Variablen, die durch andere Variablen erklärt werden, als endogen bezeichnet und mit η beschrieben, während exogene Variablen andere Variablen definieren und mit ξ bezeichnet werden. Die Residual-Terme (δ - Messfehler/Residualvariable für einen Indikator x oder ε - Messfehler/Residualvariable für einen Indikator y) werden im Messmodell verwendet, um die latenten Variablen zu beschreiben. (Fuchs 2011; Weiber und Sarstedt 2021)

Das Strukturmodell wiederum stellt die vermuteten Beziehungen zwischen den exogenen und endogenen Variablen in Form eines Pfaddiagramms dar. Den Ausgangspunkt bilden die aufgestellten Theorien und Hypothesen. (Weiber und Sarstedt 2021; Fuchs 2011)

In der nachfolgenden, schematischen Darstellung eines SGM gibt es zwei Objekte ξ_1 and ξ_2 , die sich über exogene latente Variablen definieren und ein Objekt η_1 , das wiederum endogene Variablen definiert. Die hypothetischen Abhängigkeiten zwischen den latenten Objekten werden im Pfaddiagramm über Pfeile dargestellt und als Pfad-Koeffizienten γ notifiziert. Die Werte π und λ sind die Pfad-Koeffizienten der latenten exogenen (λ), bzw. endogenen (π) Variablen. (Fuchs 2011)

Die verwendeten Koeffizienten können je nach Ausgangsmodell variieren, aber die allgemeine Struktur ist allen Modellen gemeinsam. Im vorliegenden Schema entspricht die Notation der Modelle von Jöreskog und Sörbom. (Werner und Schermelleh-Engel 2010)

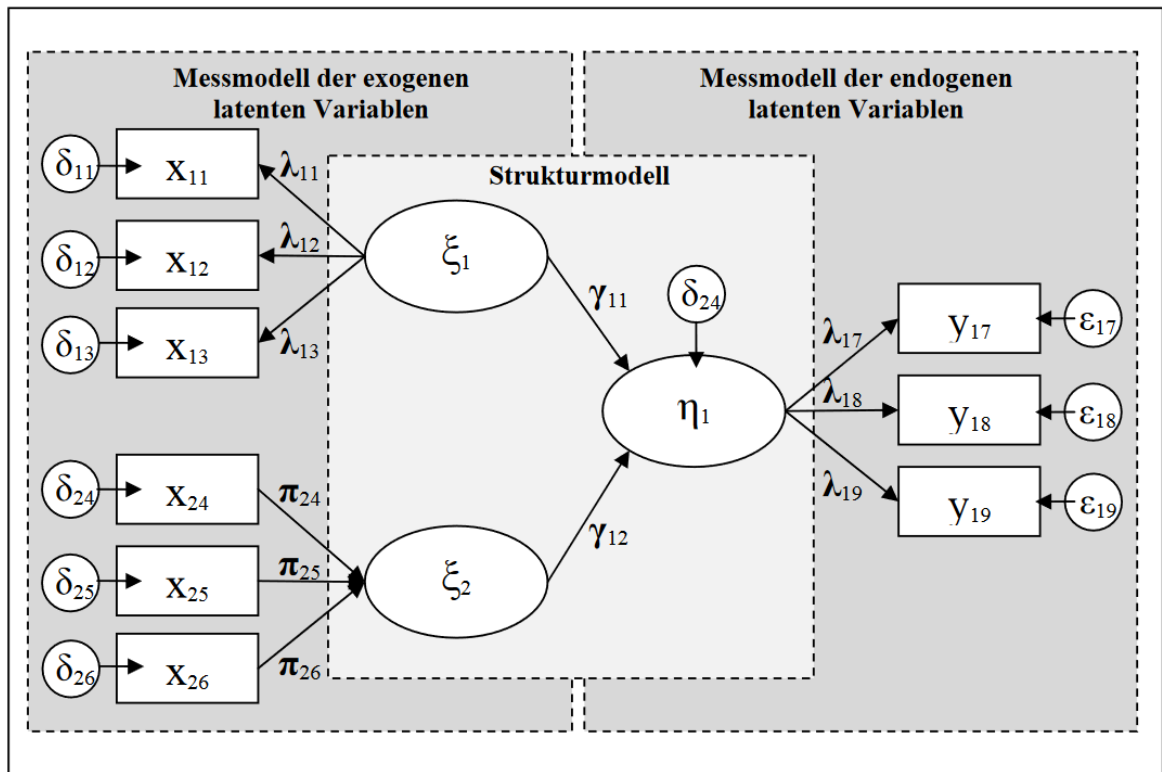


Abbildung 38: Aufbau eines SGM nach (Fuchs 2011)

Es gibt unterschiedliche Herangehensweisen, wie Strukturgleichungsmodelle aufgestellt und gelöst werden. (Fan et al. 2016) empfehlen den folgenden allgemeinen Ansatz, die einzelnen Schritte werden im Nachgang erläutert:

1. Klassifizierung der latenten Variablen gemäß den endogenen und exogenen Variablen
2. Erstellung des Strukturmodells (Formulierung von Hypothesen für jede endogene Variable)
3. Formulierung der Messmodelle für jede latente Variable
4. Grafische Darstellung des Kausalmodells (Erstellung eines Pfaddiagramms)
5. Umformung des Pfaddiagramms in ein lineares Gleichungssystem
6. Schätzung der Pfadkoeffizienten des Gleichungssystems
 - a. Ansatz der Kovarianzanalyse
 - b. Varianzanalytischer Ansatz

Die Bearbeitung eines Strukturgleichungsmodells beginnt mit der Zuordnung der jeweiligen latenten Variablen zu den aufgestellten Hypothesen, denen dann die für ihre Bestimmung notwendigen endogenen und exogenen Messgrößen zugeordnet werden. Aus den aufgestellten Hypothesen wird dann das Strukturmodell konstruiert, das die vermuteten kausalen Zusammenhänge abbildet. Ob exogene oder endogene Variablen vorliegen, ist hier schnell ersichtlich, da von exogenen Variablen nur Pfeile ausgehen. Bei endogenen Variablen zeigt mindestens eine Pfeilspitze auf die Variable. Da latente Variablen ihrer Natur nach nicht direkt gemessen werden können, werden im dritten Schritt die Messmodelle für die jeweiligen

latenten Variablen bestimmt. Dabei werden zwei Arten von Messmodellen unterschieden. Formative Messmodelle sind gegeben, wenn die beobachtbaren Indikatoren die latente Variable direkt verursachen, was der latenten Variable ξ_2 in Abbildung 38 entspricht. Im Gegensatz dazu gibt es reflektive Messmodelle, wie in Abbildung 38 der latenten Variable ξ_1 , bei denen die beobachtbaren Variablen durch die latente Variable beeinflusst werden. Die zentrale Frage in diesem Schritt ist also, ob die Veränderung der gemessenen Variable eine Veränderung der latenten Variable verursacht oder ob die Veränderung der latenten Variable eine Veränderung der gemessenen Variable verursacht. Damit ist der vierte Schritt, die Erstellung des Pfaddiagramms, abgeschlossen. Das Strukturgleichungsmodell lässt sich relativ einfach aus der Kombination der Messmodelle und Strukturmodelle erstellen. Die Struktur folgt dabei immer dem gleichen Schema. In der Mitte steht das Strukturmodell, links daneben das Messmodell der latenten exogenen Variablen und rechts daneben das Messmodell der latenten endogenen Variablen. Überdies gibt es weitere Vorgaben zur Darstellung, für die allerdings an dieser Stelle aber die Literatur verwiesen wird, zum Beispiel bei (Weiber und Sarstedt 2021) und (Jahn 2007). Um die formulierten Hypothesen zu testen, müssen im fünften Schritt der SEM die Modelle in Gleichungssysteme übersetzt werden. Dabei hilft das aufgestellte Pfaddiagramm, um die Beziehungen besser zu erkennen. Für jede abhängige Variable wird eine Gleichung aufgestellt. Diese Gleichungen werden dann zu Matrizen zusammengefasst. Der letzte Schritt ist die Schätzung des Gleichungssystems für seine (ungefähre) Lösung. Hierfür werden zwei Ansätze unterschieden, die je nach Hypothesensystem unterschiedliche Vor- und Nachteile haben. Der kovarianzanalytische Ansatz versucht, mit Hilfe der Varianzen und Kovarianzen der beobachtbaren Variablen Rückschlüsse auf Abhängigkeitsbeziehungen zu ziehen. Im Gegensatz dazu versucht der varianzanalytische Ansatz, mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate möglichst genaue Vorhersagen der tatsächlich beobachteten Werte zu erreichen. (Schönhofer et al. 2023a; Fuchs 2011; Maruyama op. 1998; Fan et al. 2016; Weiber und Sarstedt 2021; Jahn 2007; Hox und Bechger 1998)

Einen anderen Ansatz zur Erstellung und Auswertung eines SGM, welchen auch (Schönhofer et al. 2023a) im Rahmen der ersten Auswertung der vorliegenden Daten nutzen, schlägt (Fuchs 2011) vor.

1. Theoretische Grundlage und Hypothesenbildung
2. Wahl der Methode
3. Modellformulierung
4. Empirische Erhebung
5. Schätzung der Parameter
6. Auswertung der Schätzergebnisse
7. Modifikation der Modellstruktur

Die beiden vorab genannten Herangehensweisen haben große Schnittmengen. Unterschiedlich ist beispielsweise, dass der zweite Ansatz eine Optimierungsschleife enthält. Auf eine weitere Vertiefung der einzelnen Schritte und weitere alternative Vorgehensweisen

wird an dieser Stelle verzichtet und auf die vorab genannten Quellen sowie weitere Sekundärliteratur verwiesen.

Zur Auswertung der oben genannten Umfrage kam bei (Schönhofer und Bogenberger 2022; Schönhofer et al. 2023a) die Software SmartPLS 3.0 zum Einsatz. Damit wurden die Einflussfaktoren der Variablen auf das Modell sowie deren Abhängigkeiten untereinander abgebildet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 39 dargestellt.

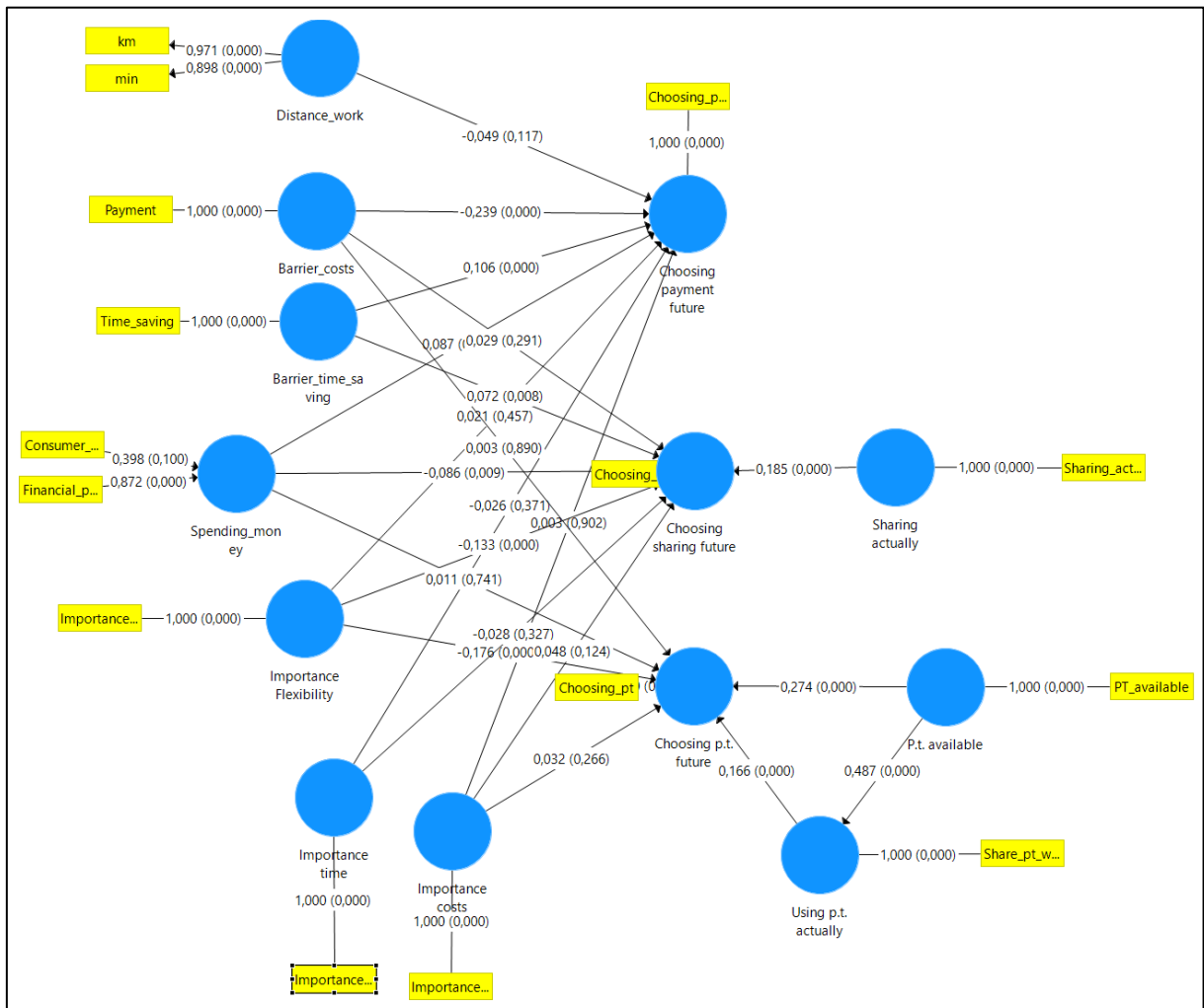


Abbildung 39: SGM zur Verkehrsmittelwahl (Schönhofer et al. 2023a)

Abbildung 39 wirkt auf den ersten Blick unübersichtlich und wenig aussagekräftig. Mit den vorab erläuterten Rahmenbedingungen können aus der Grafik jedoch schnell Rückschlüsse über die Abhängigkeiten gezogen werden. So zeigt sich klar, dass die Bereitschaft für einen Sondernutzungsstreifen zu bezahlen, von den Kosten der Nutzung ($p < 0,01$), der Zeitersparnis ($p < 0,01$) und der Möglichkeit sowie Bereitschaft Geld auszugeben ($p < 0,019$) abhängen. Im Gegensatz dazu spielen die Pendelstrecke ($p = 0,17$), das Bedürfnis nach Flexibilität ($p = 0,457$), die persönliche Bedeutung von Zeit ($p = 0,307$) sowie die persönliche Bedeutung von Kosten ($p = 0,902$) keine Rolle, wenn es um die Wahl des Verkehrsmittels geht.

Die Bereitschaft eine Fahrgemeinschaft einzugehen, hängt wiederum von der gesparten Reisezeit ($p=0,008$), der Möglichkeit und Bereitschaft Geld auszugeben ($p=0,009$), (negativ) vom Bedürfnis nach Flexibilität ($p<0,001$) und ob bereits heute eine Fahrgemeinschaft genutzt wird ($p<0,01$) ab. Die Kosten einer Expressspur ($p=0,291$), die persönliche Bedeutung von Zeit ($p=0,341$) sowie die persönliche Bedeutung von Kosten ($p=0,124$) spielen hingegen keine Rolle.

Die Entscheidung öffentliche Verkehrsmittel zu nutzen, wird (negativ) beeinflusst durch den Wunsch nach Flexibilität ($p<0,001$), die Verfügbarkeit öffentlicher Verkehrsmittel ($p<0,01$) und die tatsächliche Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel, die ihrerseits auch von der Verfügbarkeit beeinflusst wird. Im Gegensatz dazu wird die Entscheidung für die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel nicht durch die Kosten für die Expressspur ($p=0,890$), die Möglichkeit und Bereitschaft, Geld auszugeben ($p=0,741$) und die persönliche Bedeutung der Kosten ($p=0,266$) beeinflusst. (Schönhofer et al. 2023a)

3.1.3 Einflussfaktoren zur Nutzung von Managed Lanes

Die Einflussfaktoren für die Wahl des Verkehrsmittels sind spätestens seit den 1950er-Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Dementsprechend vielfältig ist die hierzu verfügbare Literatur, die sich über verschiedene Forschungsdisziplinen streckt, angefangen von den (Verkehrs-)Ingenieurwissenschaften, die Psychologie über die Soziologie bis hin zu wirtschaftswissenschaftlichen Betrachtungen. Die einzelnen Einflussfaktoren wurden dabei häufig unterschiedlich definiert und bewertet, entsprechend haben je nach Fachrichtung eine unterschiedliche Relevanz. Für die vorliegende Doktorarbeit haben die folgenden vier Bewertungsfelder sowie die beiden Werte Value of Time (VOT) und Value of Reliability (VOR) besondere Bedeutung. Dabei ist klar, dass sich die Bewertungsfelder teilweise auch gegenseitig beeinflussen.

Zeitlich

Schon in den 1980er-Jahren wiesen (Walther und Thomä 1980) nach, dass die zeitliche Komponente den größten Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl hat. Dabei beinhaltet die zeitliche Komponente nicht nur die reine Reisezeit, sondern erwartbare Verspätungen, Verluste für Hol- und Bringdienste, Reisezeitgewinne durch Managed Lanes oder Verluste durch den Parksuchverkehr. Ebenso sind in diesem Komplex die Themen Zeit zum Erreichen des Verkehrsmittels, Warte- und Umsteigezeiten oder der Weg vom Verkehrsmittel zum endgültigen Zielpunkt enthalten.

Die unterschiedlichen Zeitblöcke beim Pendeln werden von Menschen unterschiedlich wahrgenommen und bewertet. Generell gilt, je sinnvoller ein Zeitabschnitt wahrgenommen wird, desto „schneller vergeht die Zeit“ subjektiv und umso größer ist die Bereitschaft den Zeitaufwand einzugehen. Die größte Sinnhaftigkeit schreiben Pendlern der direkten Fahrtzeit zu, gefolgt von Hol-/Bringdiensten und Parksuchverkehr. Die geringste Bereitschaft besteht bei Wartezeiten, die beispielsweise bei Umsteigevorgängen oder Stau entstehen.

Interessanterweise werden stetige, aber langsamere Fahrten positiver wahrgenommen als Wartezeiten mit anschließend schnelleren Fahrten, auch wenn die gesamte Reisezeit gleich lang ist. (Shelat et al. 2021; Rapp 2004)

Besondere Relevanz für Pendler haben subjektive und objektive Reisezeitgewinne, die sie aus dem Wechsel des Verkehrsmittels oder der Nutzung einer Managed Lane ziehen können. Die Bedeutung dieses Wertes wurde unter anderem von (Patil et al. 2011) herausgearbeitet. Sie zeigten unter anderem, dass das verfügbare Haushaltseinkommen einen großen Einfluss auf die Bedeutung der Reisezeitgewinne hat. Dabei ist die Bedeutung der Reisezeitgewinne umso höher, je größer das Einkommen ist.

Finanziell

Neben den zeitlichen Aspekten sind die finanziellen Einflussfaktoren entscheidend für den Erfolg einer Managed Lane. Dabei muss zwischen finanziellen Belastungen, also Mehrkosten und Entlastungen, also Einsparungen, unterschieden werden. Insbesondere bei Mehrkosten muss auf die soziale Ausgewogenheit der Maßnahme geachtet werden, um die soziale Akzeptanz einer Maßnahme nicht zu gefährden. (Casady et al. 2020)

Generell können Mehrkosten einen starken Verdrängungseffekt hin zu anderen Verkehrsträgern entwickeln. Die Bereitschaft für die Nutzung eines Fahrstreifens zu bezahlen, ist dabei von vielen Faktoren abhängig, wie (Abulibdeh und Zaidan 2018) herausarbeiten. Dies hat auch Auswirkungen auf den Projekterfolg einer Maßnahme, wie (Schwimmer et al. 2019) nachweisen können. In Summe muss das Kostenregime genau austariert werden zwischen den verkehrlichen und gegebenenfalls auch vorhandenen ökonomischen Interessen einerseits und den finanziellen Belastungsgrenzen der Verkehrsteilnehmer andererseits (Burriss et al. 2021).

Besondere Relevanz für die Pendler hat die Zuverlässigkeit der Kosten sowie der Ertrag, der aus den investierten Mitteln erwächst. In der Praxis sind dies in der Regel Reisezeitvorteile oder die Vermeidung von Reisezeitschwankungen. Hier gilt der logische Zusammenhang, je besser das subjektive Nutzen-Kosten-Verhältnis ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit einer Investition oder Nutzung der Managed Lane.

Sozio-ökonomisch

Die sozio-ökonomischen Faktoren sind etwas abstrakter als die zeitlichen und monetären Einflüsse, dennoch haben sich auch hier über die Jahre Systeme zur Messbarmachung etabliert. Das Themenfeld sozio-ökonomisch wird in der Literatur teilweise etwas anders gefasst, so sind auch soziodemografischen Faktoren oder Sozialstatus gängige Begriffe, die jedoch teilweise enger gefasst sind oder andere Themen beinhalten. Für diese Arbeit werden unter dem Themenfeld sozio-ökonomisch die Faktoren Status, politische Wahrnehmung des Transportmittels, sozialer Anreiz bei der Verkehrsmittelwahl, subjektives Sicherheitsempfinden und Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln. Zudem spielen persönliche

Faktoren wie das Alter, die Haushaltsgröße, der Wohnort, das Geschlecht oder Beruf und Einkommen sowie der persönliche Charakter eine große Rolle.

Eine zentrale Rolle bei den sozio-ökonomischen Faktoren spielt die Persönlichkeitsstruktur der einzelnen Personen. Hier hat sich die Methodik der „Big Five“, teilweise auch „OCEAN-Modell“ genannt, etabliert, die jede Person anhand der fünf Merkmale Aufgeschlossenheit, Gewissenhaftigkeit, Extraversion, Verträglichkeit und Neurotizismus einstuft. Daraus ergeben sich fünf Persönlichkeitsdimensionen, die nochmals in sechs Unterdimensionen verfeinern lassen. (Digman 1990; Gerlitz und Schupp 2005) Das Modell hat seine Ursprünge in den 1920er- und 1930er-Jahren und wurde über die Jahre stetig weiterentwickelt. Es findet weltweit und in verschiedenen Fachdisziplinen Anwendung. Teilweise wird das Modell als zu pauschal und nicht fein genug kritisiert, insbesondere finden nicht-westliche Wertesysteme teilweise keinen Eingang (Dehne und Schupp 2007). Für den Verkehrsbereich haben (Boltze et al. 2002) die Methodik der Big Five adaptiert und daraus fünf Mobilitätstypen abgeleitet.

- Nutzenorientierte Vielfahrer
- Statusorientierte Automobile
- Erlebnisorientierte Autofans
- Sicherheitsorientierte Immobile
- Ökologieorientierte ÖPNV-Befürworter

Die Mobilitätstypen von (Boltze et al. 2002) haben teilweise Lücken und lassen sich nicht flächendeckend für Deutschland anwenden, da sie etwa eine ÖPNV-Verbindung voraussetzen. Zudem kommen nicht-motorisierte Verkehre und neue Verkehrssysteme nicht vor. Allerdings kann die Systematik einen guten Ausgangspunkt zur Beurteilung der sozio-ökonomischen Faktoren bilden. Unter anderem bei (Phithakkitnukoon 2022) wird aufgezeigt, welch großen Einfluss „weiche“ Faktoren auf die Verkehrsmittelwahl haben. So spielt der persönliche Status eine große Rolle bei der Wahl des Verkehrsmittels und darüber hinaus. Beispielsweise neigen wohlhabendere Menschen eher zur Wahl eines größeren PKW und meiden verstärkt unkomfortablere Reisemöglichkeiten wie den ÖPNV. Dies wird flankiert von der politischen und gesellschaftlichen Wahrnehmung des Verkehrsmittels. So meiden insbesondere Menschen mit urbanem Wohnort teilweise ausgewählte Transportmittel, da sie nicht in den persönlichen Lebensstil und moralischen Handlungsraum passen, obwohl sie möglicherweise objektiv Vorteile für den Einzelnen bringen (Phithakkitnukoon 2022; Limtanakool et al. 2006). Auch das persönliche Umfeld beeinflusst die Verkehrsmittelwahl durch Propagieren bestimmter Mobilitätsformen und stellenweise Vorbildfunktion.

Unterschiedliche Studien, beispielsweise von (Patterson et al. 2005), zeigen, dass das Geschlecht einen starken Einfluss auf das Pendelverhalten hat. So übernehmen Frauen häufiger als Männer Aufgaben der Kinderbetreuung, die Hol- und Bringdienste beinhalten und damit auch ein strikteres Zeitenmanagement voraussetzt. Zudem sind Frauen sensibler, was ihr subjektives Sicherheitsempfinden betrifft und meiden unbekannte Fahrgemeinschaften,

oder bestimmte Formen des ÖPNVs. Aus diesen Gründen haben Frauen eine höhere Neigung, den PKW als Verkehrsmittel zu wählen.

Der ausgeübte Beruf beeinflusst die Verkehrsmittelwahl hinsichtlich der notwendigen Flexibilität und Arbeitszeiten. Stehen beispielsweise im Schichtbetrieb für bestimmte Zeiten keine Angebote des ÖPNV zur Verfügung, steigt die Neigung zur PKW-Nutzung. Eng damit verknüpft ist das Einkommen, welches einen Anreiz zur Nutzung von möglichst günstiger Mobilität sein kann und die Bedeutung von Komfort mindert. Damit einher geht auch der Wohnort. Tendenziell steigt mit höherem Einkommen auch die Bereitschaft zu Pendeln sowie die zurückgelegte Pendeldistanz (Dauth und Haller 2018). Stehen am Wohn- bzw. Arbeitsort nur in begrenztem Umfang PKW-Stellplätze oder kein ÖPNV-Angebot zur Verfügung, beeinflusst das das Wahlverhalten (Limtanakool et al. 2006). Ebenfalls relevant in diesem Zusammenhang ist die Größe des Haushalts und die Anzahl der abhängigen Verkehrsteilnehmer wie Kinder oder Hochbetagte. Hier ist häufig die größere Flexibilität von Kfz erforderlich, um durch Kombinationen von Wegen eine größere Effizienz zu schaffen.

Komfort

Das Themenfeld Komfort ist von hoher Bedeutung, aber auch sehr subjektiv. Die Bewertung, was zu Komfort zählt und wie die einzelnen Parameter zu gewichten sind, ist für jeden Menschen unterschiedlich. Zum Themenkomplex Komfort gehören unter anderem Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit, die auch beim Value of Reliability eine Rolle spielen. Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit zählen für viele Menschen zu den wichtigsten Wahlkriterien (Liu et al. 2019). Neben der klassischen Pünktlichkeit spielen hier auch die rechtzeitige und umfängliche Information bei Abweichungen eine Rolle.

Der Wunsch nach Individualität hängt sehr stark von den persönlichen Vorlieben eines Menschen ab und kann sehr stark ausgeprägt sein, aber auch nur eine völlig untergeordnete Rolle bei der Verkehrsmittelwahl spielen. Die Individualität beim Pendeln zeigt sich an den Möglichkeiten, die Fahrt nach seinen Wünschen zu gestalten, sei es bei der Wahl von Musik oder Temperatur, aber auch die Freiheiten hinsichtlich Verhalten im Verkehrsmittel und dem zum Ausdruck bringen persönlicher Überzeugungen und Gefühle. Eng mit der Individualität verwandt ist die Flexibilität. Die Möglichkeit kurzfristig Änderungen bei Route, Fahrzeit oder sogar dem Transportmittel vorzunehmen, ist insbesondere in Haushalten mit abhängigen Personen, wie Kindern, von großer Bedeutung und hat einen deutlichen Einfluss auf das Wahlverhalten (Thorhauge et al. 2020). Damit indirekt verbunden ist auch die Direktheit der Verbindung. Jeder Wechsel des Verkehrsmittels führt zu Reisezeitverlusten. Zudem wird der Komfort reduziert, da ein neuer Platz gesucht werden muss und es nicht möglich ist eine Tätigkeit, wie das Lesen eines Buches, dauerhaft und ungestört vorzunehmen.

Ebenfalls ein zentrales Element der Themengruppe Komfort, welches allerdings von Reisenden unterschiedlich bewertet wird, ist der Reisekomfort. Hier spielen die Auslastung und damit verbunden die Verfügbarkeit von Sitzplätzen sowie ein möglicher Abstand zu anderen Reisenden eine große Rolle, ebenso das Platzangebot, auch für mögliches Gepäck.

Auch die Möglichkeit eine Fahrkarte oder Ähnliches zu erwerben, bei mehreren Streckenabschnitten auch ein Ticket für mehrere Strecken, und die damit verbundene Verständlichkeit eines Tarifsystems sind entscheidend, wie komfortabel ein Verkehrsmittel wahrgenommen wird.

Value of Time (VOT)

Im Gegensatz zu den vorab beschriebenen Themengebieten sind der Value of Time (VOT) sowie der nachfolgend beschriebene Value of Reliability (VOR) konkrete Werte, die zentral für die Verkehrsmittelwahl sind. Der VOT, selten auch Value of Travel Time (VTT) beschreibt dabei den monetären Wert, den Reisende einer Zeiteinheit Reisezeit beimessen, also welche Entschädigung sie z. B. für eine Minute Verspätung erwarten oder welchen Preis sie für eine Minute Beschleunigung zu zahlen bereit sind. Daneben gibt es noch den Wert Value of Travel Time Savings (VTTS), welcher beschreibt, was eine Person für eine Minute Reisezeitgewinn zu zahlen bereit ist. Der VTTS ist damit spezifischer als der VOT. (Jin et al. 2015)

Der VOT ist von Person zu Person unterschiedlich und variiert auch für die jeweilige Tätigkeit. Damit ist er in der Praxis nur sehr schwer zu bestimmen und muss in der Regel über Schätzungen angenähert werden. In der Regel liegt er für berufliche Fahrten höher als bei Freizeiterminen. In Deutschland wurde der VOT erstmals im Jahr 2012 zur Vorbereitung der Aufstellung des Bundesverkehrswegeplans 2030 (BVWP 2030) ermittelt. Für den Weg zur Arbeits- oder Ausbildungsstelle betrug er 4,72 €/h (Axhausen et al. 2015). Die Werte wurden seitdem nicht mehr repräsentativ fortgeschrieben, geht man von einem Anstieg gemäß der Inflation von 18,2 % zwischen 2012 und 2022 (Statistisches Bundesamt Deutschland 2022) aus, so dürfte der Wert Ende des Jahres 2022 bei rund 5,58 €/h liegen. Deutschland liegt damit in Europa im oberen Mittelfeld, ebenso im weltweiten Vergleich der Industriestaaten (Shires und Jong 2009).

Generell wird der VOT aus dem Verhältnis der Fahrtzeit- (β_T) und Kostenparameter (β_C) gebildet.

$$VOT = \frac{\beta_T}{\beta_C} \quad (1)$$

Da dieser Zusammenhang jedoch nur bei linearen Zusammenhängen gilt, die in der Praxis kaum auftreten, muss das Modell um die partielle Ableitung erweitert werden. (Axhausen et al. 2015; Jin et al. 2015)

$$VOT = \frac{\partial U / \partial \text{Fahrzeit}}{\partial U / \partial \text{Kosten}} \quad (2)$$

Wobei die Nutzenfunktion U folgendermaßen gebildet wird:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \left(\beta + \frac{\alpha}{x + \gamma} \right) * \left(\frac{\text{Einkommen}}{\mu(\text{Einkommen})} \right)^{\lambda_{\text{Einkommen}}} \quad (3)$$

U_i = Nutzenfunktion

$x_{i,j}$ = betrachtete Attribute (Fahrzeit oder Kosten)

(α, β, γ) = geschätzte Parameter des betrachteten Attributs

$\lambda_{\text{Einkommen}}$ = geschätzte Elastizität der Interaktion des betrachteten Attributs mit dem Einkommen

$\mu(\text{Einkommen})$ = mittleres Einkommen

Eine weitere Methodik zur überschlägigen Ermittlung des VOT stammt US Department of Transportation (U.S. Department of Transportation 09/2016) und hat einen eher volkswirtschaftlichen Ansatz. Hier werden das jährlich zur Verfügung stehende Haushaltseinkommen durch die Anzahl der Arbeitsstunden pro Jahr geteilt, was den VOT ergibt.

Value of Reliability (VOR)

Der Value of Reliability (VOR) bezeichnet den Wert, den Verkehrsteilnehmer der Zuverlässigkeit des Verkehrsmittels zuschreiben. Unter Zuverlässigkeit fallen Komponenten wie Pünktlichkeit, Ausfallwahrscheinlichkeit oder Regelmäßigkeit. Vor allem für Pendler mit längeren Strecken und eingeschränkten Alternativen, die beispielsweise bei einer Störung im U-Bahnnetz nicht auf das Busnetz ausweichen können, ist der VOR ein wichtiger Faktor, wenn es um die Wahl des Verkehrsmittels geht.

Zur Bestimmung der Zuverlässigkeit werden verschiedene Hilfswerte herangezogen, unter anderem der Travel Time Index (TTI), der das Verhältnis der durchschnittlichen Fahrzeit zur Fahrzeit ohne Stau und Behinderungen beschreibt, der Buffer Index (BI), der angibt, wie viel Puffer man einrechnen muss, um mit mindestens 95 % Wahrscheinlichkeit pünktlich zu kommen oder die Failure and On-time Measure, welche den Anteil der Fahrten bestimmt, die länger als einen bestimmten Schwellenwert dauern (Culotta et al. 2019). Weitere Variablen werden unter anderem bei (Culotta et al. 2019; Carrion und Levinson 2012) erläutert.

Mathematisch betrachtet, kann der VOR über folgende Formel gefasst werden

$$VOR = \frac{\partial U / \sigma \text{Fahrzeitabweichungen}}{\partial U / \partial \text{Kosten}} \quad (4)$$

mit

$$\sigma \text{Fahrzeitabweichungen} = \text{Abweichung der Reisezeitverteilung}$$

Die anderen Variablen sind wie beim VOT definiert (Axhausen et al. 2015).

Der VOR ist sehr schwierig zu bestimmen, entsprechend schwanken auch die Werte in der Literatur deutlich. Die Werte sind von vielen Faktoren abhängig, wie der Art des Weges, von soziodemografischen Daten des Reisenden, wie Alter, Einkommen oder Geschlecht, sowie der Länge des Weges. Eine Studie im Umfeld der Aufstellung des BVWP 2030 aus dem Jahr 2016 ergab einen Wert von rund 9 €/h für Pendler (Bartel et al. 2016). Eine Studie des Fraunhofer-Instituts und Horváth & Partners (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation und Horváth & Partners 2016) kommt sogar auf einen Wert von durchschnittlich 16 €/h, allerdings über alle Fahrtzwecke hinweg gemittelt. International liegt Deutschland damit im oberen Mittelfeld. Generell ist der VOT umso höher, je höher die Wirtschaftskraft einer Region und der Pendler sind.

3.1.4 Kostenfunktionen von Managed Lanes

Die Kostenfunktionen von Managed Lanes hängen von der Art der Managed Lane sowie den Zielsetzungen bei der Planung ab. Grundsätzlich bestehen diese Kostenfunktionen aus Fixkosten und Grenzkosten. Zudem kann zwischen den Kosten von Betreibern und Nutzern unterschieden werden sowie zwischen unterschiedlichen Wirkungsbereichen. In der Regel entwickelt sich bei Infrastrukturprojekten eine degressive Langfristkostenfunktion, was bedeutet, dass steigende Verkehrszahlen zu geringeren Durchschnittskosten führen, da die Fixkosten auf mehr Agenten verteilt werden können. (Mitusch 2022) Bei allen Kostenfeldern sind sowohl Personal- als auch Sachkosten enthalten.

Bei den Fixkosten auf Betreiberseite handelt es sich im Groben um die Kosten für Bau, Betrieb und Unterhalt der Managed Lane sowie der Steuerung, also den Kosten, die verkehrsmengenunabhängig auftreten. Dabei beschreiben die Betriebskosten je Aufwendungen, die notwendig sind, um die Straße für den täglichen Bedarf nutzbar zu halten, unter anderem Schneeräumen im Winter oder Grünpflege im Sommer. Im Betrieb nicht enthalten sind Kosten zur Steuerung der Managed Lane, beispielsweise um Anzeigen für Mauttafeln zu betreiben. Der Unterhalt umfasst kleinere Reparaturarbeiten, wie das Verfüllen von Schlaglöchern oder den Austausch von Leitpfosten, die für die Funktionstauglichkeit und den dauerhaften Werterhalt der Straße notwendig sind. Im Bereich Steuerung werden die Kosten für die technische Ausstattung der Strecke und der Betriebszentrale sowie die Kosten

für die verkehrstechnische Steuerung der Strecke zusammengefasst. Für Nutzer fallen Themen wie die Abschreibung ihres Fahrzeugs und Versicherungen unter die Fixkosten. Diese werden von Privatpersonen interessanterweise jedoch als nur geringfügig wahrgenommen (Krämer 2016).

Die Grenzkosten, auch Marginalkosten genannt, bezeichnen die Kosten, die durch die Benutzung der Infrastruktur durch einen Agenten oder für den Agenten entstehen. Für Betreiber fällt unter anderem der Verschleiß unter die Marginalkosten, ebenso in einem gewissen Umfang die Verwaltungskosten, die mit zunehmender Verkehrszahl steigen. Für Pendler sind die Nutzungsgebühren der wichtigste Teil ihrer Grenzkosten. Die Nutzungsgebühren können in Form von monetären Abgaben, Reisezeitverlusten durch Hol-/Bringdienste oder Zeitverluste auftreten. Zudem können Kosten durch den Wechsel der Fahrzeugtechnologie, um die Managed Lane nutzen zu können, entstehen.

Weder den Betreibern noch den Nutzern direkt zugeordnet sind die externen Kosten, die durch Verkehr entstehen. Diese sind für eine ganzheitliche Bewertung einer Managed Lane jedoch essenziell und können ebenfalls den Grenzkosten zugeordnet werden. In den vergangenen Jahren haben sich bei den externen Kosten insbesondere die Themenfelder Umweltkosten und soziale Kosten als besonders bedeutsam erwiesen. Bei den Umweltkosten handelt es sich um die Kosten, die der Allgemeinheit durch Mobilität entstehen. Dabei handelt es sich um Emissionen durch die Verbrennung von Energieträgern, Lärmemissionen oder Flächenverbrauch. (Postpischil et al. 2022) Die Umweltkosten variieren dabei lokal, je nach den betroffenen Schutzgütern. Die sozialen Kosten beschreiben die Auswirkungen einer Managed Lane auf Verkehrsmuster oder Verlagerungseffekte. Durch höhere Kosten können Menschen mit kleinerem und mittlerem Einkommen von der Managed Lane gedrängt und gezwungen werden, auf andere Verkehrsmittel oder Routen auszuweichen. Dies kann zu einer Bevorzugung bestimmter sozialer Schichten führen. Die Verlagerungseffekte haben wiederum Auswirkungen auf angrenzende Infrastruktur, wenn der Verkehr beispielsweise durch angrenzende Städte statt über die Managed Lane fließt oder eine zusätzliche Nachfrage auf bestehende alternative Verkehrsmittel trifft. (Kasraian et al. 2016)

In die Kostenfunktion von Managed Lanes gehen jedoch nicht nur negative Werte ein, sondern auch positive. In den meisten Fällen von Managed Lanes sinkt für deren Nutzer die Reisezeit. Je nachdem worauf der Fokus der Managed Lane liegt, können dabei regelmäßig Einsparungen im zweistelligen Minutenbereich oder zweistelligen Prozentbereich möglich (Collier und Goodin 2004). Diese Reisezeitgewinne sind für Pendler mit die wichtigsten Gründe für die Nutzung von Managed Lanes. Die Bedeutung der Reisezeitgewinne ist von den jeweiligen VOT-Werten der Person abhängig. Zudem steigt durch die Steuerung der Managed Lane die Zuverlässigkeit und damit sinkt die Gefahr von Verspätungen durch Stau. Dieser besseren Planbarkeit wird mit dem VOR Rechnung getragen. Die zumindest teilweise Trennung der Verkehre kann auch zu einer Homogenisierung im Verkehrsfluss führen, die weitere Vorteile haben kann. Dabei kann durch die steuernde Wirkung der Managed Lane zumindest die Entstehung von Stau gemindert werden. Wählt man einen volkswirtschaftlichen

Ansatz, sind zudem eingesparte externe Kosten wie Staukosten oder reduzierte Emissionen relevante Faktoren, die angesetzt werden können.

Auswertungen realisierter Managed Lane Projekte zeigen, dass nicht immer ein Kosten-Nutzen-Verhältnis (NKV) von 1 erreicht werden wird (Burris et al. 2021). Die Ursachen dafür können vielfältig sein. Zum einen kann sich der Verkehr anders als geplant entwickeln, sei es durch Fehlplanungen im Projekt, aber auch durch unvorhergesehene externe Einflussfaktoren, wie die Corona-Pandemie oder Änderungen in der Gewerbestruktur im Einzugsbereich der Managed Lane. Teilweise wird aber auch ein $NKV < 1$ billigend in Kauf genommen, wenn eine neue Managed Lane eingerichtet wird. Die kann der Fall sein, wenn beispielsweise aufgrund politischer Vorgaben bestimmte Verkehrsteilnehmer privilegiert werden sollen oder rechtliche Rahmenbedingungen bestimmte Maßnahmen notwendig machen. Zudem ist zu beachten, dass je nach Definition des Wirkungsbereichs das NKV unterschiedlich ausfallen kann. (Burris et al. 2021; Fitzpatrick et al. 2016; Casady et al.; Casady et al. 2020)

Aus fachlicher Sicht bleibt jedoch festzuhalten, dass das NKV für eine erfolgreiche Managed Lane in jedem Fall über 1 liegen muss.

3.2 Theorien zum Wahlverhalten bei der Verkehrsmittelwahl

Es gibt unterschiedliche Theorien, nach welchen Gesichtspunkten Reisende ihr Verkehrsmittel wählen. Das Thema wird dabei in unterschiedlichen Fachdisziplinen aufgegriffen, beispielsweise in der Betriebswirtschaft, wenn es darum geht, wie neue Kunden für ein Verkehrsmittel gewonnen werden können, in der Soziologie und Psychologie, wenn es um Wahlentscheidungen von Menschen geht sowie klassisch in den Verkehrswissenschaften, in denen der Modal Split eine entscheidende Rolle spielt. Auch wenn es in den Zielen der verschiedenen Fachgebiete Unterschiede gibt, ergeben sich in den methodischen Ansätzen oft Überschneidungen. Aufgrund der vielfältigen wissenschaftlichen Themenbereiche gibt es eine Vielzahl an Theorien zum Wahlverhalten in der Verkehrsmittelwahl. Im Folgenden werden einige der für die Verkehrsplanung wichtigsten näher erläutert, darüber hinaus gibt es noch eine Reihe weiterer Theorien, für die auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen wird.

3.2.1 Rational Choice Theory

Die mit am weitest verbreitete Theorie zur Bestimmung der Verkehrsmittelwahl im Verkehrswesen ist die Rational Choice Theorie (RCT, englisch Rational Choice Theory). Sie ist auch im Bereich der Soziologie weitverbreitet und findet stellenweise Anwendung in der Betriebswirtschaftslehre. Die Grundlagen der RCT sind auch Ausgangspunkt der in den folgenden Kapiteln erarbeiteten Nachfragemodelle.

Die Grundannahme der Rational Choice Theorie ist, dass alle Entscheidungen und Handlungen auf Grundlage rationaler und vernünftiger Überlegungen getroffen werden, also sich Menschen stets für die Alternative entscheiden, die ihnen den meisten Nutzen bringt.

Dabei ist die jeweilige Bewertung jedes einzelnen in der Regel subjektiv und schwankt von Mensch zu Mensch. Die Grundlagen der RTC gehen bis ins 18. Jahrhundert zurück und erlangten insbesondere ab den 1980er-Jahren größere Relevanz in der Forschung und Praxis. (Brock et al. 2009)

Bei den Vorteilen, die Verkehrsteilnehmer für sich identifizieren und in ihre Abwägung der Verkehrsmittelwahl aufnehmen, spielen unter anderem Kosten, Reisezeit und Komfort eine wichtige Rolle. Je nach persönlicher Einstellung des Reisenden können auch Faktoren wie die Umweltwirkung oder der soziale Status eines Verkehrsmittels relevant sein. Die Schwächen des Rational Choice Modells liegen darin, dass bestimmte Verhaltensweisen, wie beispielsweise altruistische oder hedonistische nicht oder nur unvollständig abgebildet werden können, da sie rationell kaum quantifiziert werden können und kaum einem Verkehrsteilnehmer alle Informationen vorliegen, um komplett rational zu handeln.

Für den Verkehrsbereich stammen die Grundlagen zur Anwendung der RCT von (Domencich und McFadden 1975). Sie definieren, dass Verkehrsteilnehmer sich stets für das Verkehrsmittel entscheiden, das den größten Nutzenwert U_j für sie hat, wenn $U_j > U_i$. Der Nutzwert U ist dabei folgendermaßen definiert:

$$U_j = V(a_j, S) + \varepsilon_j \quad (5)$$

Wobei i, j die alternativen Verkehrsmittel darstellen, a_j die Eigenschaften des Verkehrsmittels beschreibt, S die personenspezifischen Merkmale abbildet (Alter, Geschlecht, Führerschein, ...) und ε_j eine Zufallskomponente zur Abbildung der Fehlerwerte definiert.

Stellenweise wird in der Forschung zwischen engen und weiten RC-Modellen unterschieden. Dabei bezeichnen enge RC-Modelle solche, die ausschließlich „harte“ Kriterien wie Zeit oder Kosten berücksichtigen und von einem möglichst umfassend informierten Verkehrsteilnehmer ausgehen, der den eigenen Vorteil in den Mittelpunkt stellt. Demgegenüber werden bei weiten RC-Modellen auch „weichere“ Faktoren wie das Umweltbewusstsein oder das subjektive Sicherheitsempfinden berücksichtigt. Zudem gehen diese Modelle davon aus, dass Menschen keine vollständigen Informationen besitzen und diese auch nicht immer anstreben. Diesem Faktor wird mit veränderten Fehlerwerten Rechnung getragen. (Davidov 2003)

3.2.2 Theory of Planned Behavior

Die Theory of Planned Behavior (TPB) (deutsch, Theorie des geplanten Verhaltens) wurde in den 1980er-Jahren im Umfeld der Sozialpsychologie von Ajzen und Fishbein entwickelt (Ajzen 1991). Ausgangspunkt war dabei die wenige Jahre zuvor entwickelte „Theory of Reasoned Action“, die ebenfalls von Ajzen stammt. Zentrale Annahme der Modelle ist dabei, dass die Wahl des Verkehrsmittels von den persönlichen Werten und Zielen des Verkehrsteilnehmers abhängen. Die TPB wurde seit den 1980er-Jahren weiterentwickelt und konnte sich als Standardverfahren im Bereich der Soziologie und Teilen der Psychologie etablieren. (Bamberg et al. 2003)

Grundlage der TPB sind drei Einflussfaktoren, nach denen Menschen ihr Verhalten ausrichten (Ajzen 1991):

- **Einstellung:** Die Einstellung beschreibt das innere Verhältnis und die Erwartungen, die eine Person gegenüber etwas hat. Diese Erwartungen und die damit verbundenen Konsequenzen sind zentral im Abwägungsprozess der Entscheidungsfindung. Je positiver die Einstellung zu einem Verkehrsmittel ist, umso größer ist die Wahlwahrscheinlichkeit bei freier Verkehrsmittelwahl.
- **Subjektive Norm:** Die subjektive Norm umfasst die wahrgenommenen sozialen Erwartungen des engeren oder weiteren Umfelds bezüglich des Verhaltens. Die Entscheidung für oder gegen ein bestimmtes Verkehrsmittel hängt auch davon ab, was die Gesellschaft oder das Umfeld als angemessen betrachten. Die wahrgenommene Zustimmung oder Ablehnung durch die sozialen Gruppen kann das Verhalten beeinflussen.
- **Wahrgenommene Verhaltenskontrolle:** Die wahrgenommene Verhaltenskontrolle bezieht sich auf die subjektiv wahrgenommenen Hindernisse oder Erleichterungen einer Person, wenn sie ein bestimmtes Verhalten ausführt. Diese Überzeugungen können von den Fähigkeiten des Individuums, etwa ein Fahrzeug führen zu können, dem Zugang zu bestimmten Verkehrsmitteln, sowie von der Überzeugung, dass man in der Lage ist, das Verhalten auszuführen, abhängen. Die Bewertung der Faktoren ist dabei höchst subjektiv, beispielsweise ob ÖPNV in angemessener Reichweite zur Verfügung steht.

Die Schwäche der TPB besteht darin, dass sie vorwiegend auf geplantes Verhalten fokussiert ist und die drei beschriebenen Einflussfaktoren bei gewohnheitsmäßigen Handlungen oder Entscheidungen im Affekt nicht oder nur eingeschränkt greifen. Allerdings ist das Verhalten von Pendlern häufig von einem stark gewohnheitsmäßigen Handeln geprägt, so dass die Theorie des geplanten Verhaltens eher bei der erstmaligen Nutzung einer Route oder disruptiven Änderungen auf der Angebotsseite, wie beispielsweise das „9 €-Ticket“ in Deutschland im Jahr 2022, gute Ergebnisse liefert.

3.2.3 Theory of Constraints

Die Theory of Constraints (TOC, zu Deutsch „Engpasstheorie“) besagt, dass das Verhalten einer Person primär durch vorhandene Barrieren und Hindernisse beeinflusst wird. Auf die Verkehrsmittelwahl bezogen bedeutet das, dass die Wahlentscheidung hauptsächlich von Hindernissen, wie der Verfügbarkeit, den monetären Kosten, dem Zeitaufwand oder fehlendem Komfort beeinflusst wird. Um einen Wechsel des Verkehrsmittels zu erreichen, müssen daher eher Hindernisse abgebaut oder neue Hindernisse aufgebaut, als Privilegien geschaffen werden.

Die Grundlagen der TOC stammen aus dem Umfeld der Wirtschaftswissenschaften von Eliyahu Goldratt aus den späten 1970er- und 1980er-Jahren. Ausgangspunkt ist die

Überlegung, dass ein System nur so gut sein kann wie sein am meisten limitierender Faktor. Nach einer Identifikation der übergeordneten Ziele, im Verkehrsbereich kann das unter anderem die Steigerung des ÖPNV-Anteils am Modal Split sein, werden dann alle am (Entscheidungs-) Prozess beteiligten Schritte daraufhin untersucht, inwieweit sie limitierend wirken. Die Hindernisse können dabei physischer, finanzieller oder zeitlicher Art sein. Anschließend werden die Barrieren so verschoben und optimiert, dass die übergeordneten Ziele besser erreicht werden können. Diese Schritte werden in einer Optimierungsschleife regelmäßig wiederholt. In der Praxis hat sich hierfür der Begriff der „5 Fokussierungsschritte“ etabliert. (Rahman 1998)

Eine der zentralen Schwächen der TOC ist, dass sich die Theorie ausschließlich auf „harte“, bevorzugt in den Wirtschaftswissenschaften relevante Einflussgrößen stützt und subjektive Elemente weitestgehend keine Rolle spielen, auch wenn bekannt ist, dass diese durchaus Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl haben. Dies ist unter anderem darin begründet, dass die TOC als Management-Werkzeug zur Optimierung von Prozessen im Produktionsablauf entwickelt wurde und nicht explizit für die Verkehrsmittelwahl.

Im Verkehrsbereich sind als Einflussmöglichkeiten möglicher Barrieren unter anderem die Preisgestaltung oder die Beschränkung der Zugangsmöglichkeiten zu nennen. In den Niederlanden konnten beispielsweise (Winter et al. 2021) nachweisen, dass durch ein reduziertes Parkraumangebot im Innenstadtbereich eine substantielle Verlagerung auf den ÖPNV erreicht werden kann.

3.2.4 Social Identity Theory

Die Social Identity Theory (SIT) gehört zum Forschungsgebiet der Sozialpsychologie und wurde in den 1970er- und 80er-Jahren von H. Tajfel (Tajfel 1978) und J. Turner (Turner 1985; Tajfel 1978) entwickelt. Kernelement dieser Theorie ist, dass sich Menschen einer oder mehrerer sozialen Gruppen zugehörig fühlen und daran ihr Verhalten orientieren. Diese Gruppen können unter anderem aufgrund von Alter, Geschlecht, Hautfarbe, Beruf oder sozialem Status konstruiert werden. In ihrem Verhalten orientieren sich diese Personen dann an den Eigenschaften, von denen sie subjektiv denken, dass sie den sozialen Gruppen, denen sie sich zugehörig fühlen, zugeschrieben werden. Dabei kann es sich um einen Kleidungsstil, bestimmte Musik oder die Art des Auftretens handeln. Die Zuordnung zu einer sozialen Gruppe erfolgt oft subjektiv. Teilweise ordnen sich Personen auch mehreren sozialen Gruppen zu, deren Verhaltensweisen in Konkurrenz zueinander stehen. In diesen Fällen entscheidet oft der aktuelle räumliche oder soziale Zusammenhang über die aktuelle Verhaltensweise. (Hornsey 2008)

In Bezug auf die Verkehrsmittelwahl zeigt sich die SIT insbesondere dann, wenn bestimmten sozialen Gruppen bestimmte Transportmittel zugeschrieben werden, etwa Luxuslimousinen für Führungspersonal. Besonderen Einfluss auf die Wahl des Verkehrsmittels zeigt sich, wenn eine Person sich im Umfeld von Themen wie „Umwelt- oder Naturschutz“ oder „Radfahrer“

einordnet. Hier besteht eine besondere Affinität zu alternativen Verkehrsmitteln zum MIV. (Heinen 2016)

Folgt man der SIT, ist es hauptsächlich wichtig, bei den Verkehrsmitteln, die sich die sozialen Gruppen selbst zuschreiben, anzusetzen. Gelingt es beispielsweise, das soziale Ansehen des ÖPNVs substanziell zu steigern, so würden soziale Gruppen wie Manager bevorzugt ihr Verkehrsmittel wechseln.

Die Schwäche der SIT im Bezug auf den Mode Choice liegt darin, dass sie, im Gegensatz zur Theory of Constraints, einen komplett subjektiven Ansatz verfolgt und nicht auf „harte Fakten“ wie die Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln oder zeitliche sowie monetäre Kosten eingeht. Analog der TOC fehlt also auch hier ein Teil des Bewertungshorizonts, der in der Praxis große Relevanz für die Wahl des Verkehrsmittels hat.

3.3 Entwicklung der Nachfragemodellierung

Auf Grundlage der gewonnenen Daten und der Auswertung mittels Strukturgleichungsmodellierung wird im Folgenden die Nachfrage einer HOT-Lane auf einer Autobahn modelliert. Hierzu kommt als zusätzliches Verfahren die multinominale logistische Regression zum Einsatz. Es wird sowohl ein übergeordneter, gebietsbasierter Ansatz entwickelt, als auch ein individueller, agentenbasierter Ansatz. Der gebietsbasierte Ansatz eignet sich für größere Gruppen, deren Daten nicht in der letzten Detailschärfe bekannt sind, während mit dem agentenbasierten Verfahren genaue Aussagen für konkrete Gruppen möglich sind.

3.3.1 Multinominale logistische Regression

Sowohl im wissenschaftlichen Bereich als auch in der Praxis gilt es oft die Frage zu klären, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Alternative aus einem Pool von Angeboten gewählt werden würden und was Einfluss auf dieses Wahlverhalten hat oder wie groß eine Variable in Abhängigkeit einer anderen Variablen vermutlich wird. Da es sich bei dieser Fragestellung um ein häufig auftretendes Problem handelt, haben sich im Laufe der Zeit unterschiedliche Lösungsansätze entwickelt, die unterschiedliche Stärken wie Schwächen haben. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Verfahren werden im Folgenden nur einige der bedeutendsten aufgeführt. Diese können grob zwei Gruppen zugeordnet werden, den statistischen Verfahren sowie den Methoden der Data Science.

Historisch älter sind die statistischen Verfahren. Hierzu zählen die Logit-Modelle, die Probit-Modelle, die Poisson-Regression und die Cox-Regression.

Aufgrund ihrer theoretischen Grundlagen als Regressionsmodelle eng miteinander verwandt sind Logit-Modelle und Probit-Modelle. Während Logit-Modelle auf einer Gumbel-Verteilung der Variablen basieren, haben Probit-Modelle eine Normalverteilung als Grundlage. Beide

Verteilungsfunktionen haben nur eine Form und besitzen keine Formparameter, wobei die Logit-Funktion im Bereich ihrer Ränder aussagekräftiger ist. Die logistische Regression ist aktuell ein Standardverfahren. (Long 2003)

Die Poisson-Regression setzt Poisson-verteilte Variablen voraus und liefert die Ergebnisse auch in dieser Form. Mittels Poisson-Regression werden hauptsächlich die Anzahl an zählbaren Ereignissen vorausgesagt, welche dann erst in Wahlwahrscheinlichkeiten umgerechnet werden müssen. Bei einer direkten Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten zeigt das Modell teilweise Schwächen, da bei ungünstigen Datensätzen Werte von über 100 % auftreten können. Diesem Problem wird mit dem weiterentwickelten Ansatz der „Modified-Poisson-Regression“ (Zou 2004) entgegengewirkt. (Roback 2021)

Die Cox-Regression hat ihren Ursprung in der Medizinforschung und wird bis heute hauptsächlich in diesem Fachgebiet genutzt. Die Cox-Regression ist dabei in der Lage, ähnlich wie die multinomiale logistische Regression, den Einfluss mehrerer Variablen auf eine Zielvariable gleichzeitig zu untersuchen. Allerdings lassen sich aus der Cox-Regression keine Rückschlüsse auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung schließen. Diese Lücke wird versucht, mit der Hazard-Funktion zu schließen, wobei diese nicht an die Qualität der logistischen Regression heranreicht. (Ziegler et al. 2004)

Die Methoden der Data Science haben sich erst mit fortschreitender Digitalisierung etabliert, gewinnen aber zunehmend an Bedeutung. Beispiele sind hier „Tree-Based-Methods“ („Entscheidungsbäume“), Neuronale Netze und „k-nächste-Nachbar-Algorithmen“.

Die „Tree-Based-Methods“ sind grundsätzlich ein sehr altes Verfahren, welches bereits im 19. Jahrhundert verwendet wurde. Durch die Entwicklungen im Bereich der künstlichen Intelligenz und die damit einhergehende Möglichkeiten des selbst Lernens, hat dieses Verfahren in den vergangenen Jahren nochmals starken Auftrieb bekommen. Technisch gesehen teilt der Algorithmus die vorhandenen Daten in Entscheidungsbäume auf, die dann mit weiteren Informationen fortgeschrieben werden. Aus diesen Entscheidungsbäumen können dann Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Ereignisse ausgelesen werden. Zudem „erlernt“ die Software für verwandte Variablen ebenfalls die Eintrittswahrscheinlichkeiten. (Knuth 2021)

Künstliche neuronale Netze, häufig vereinfacht auch nur neuronale Netze genannt, wurden ursprünglich entwickelt, um die Abläufe in menschlichen und tierischen Nervensystemen abbilden zu können. Sie folgen in ihrem Aufbau und der Funktionsweise den Abläufen von Nervenzellen, sowohl in der internen Informationsverarbeitung als auch in der Kommunikation von Informationen. Mittels neuronaler Netze können traditionelle Verfahren zur Datenanalyse ersetzt werden, wobei hier aktuell noch eine relativ große Zahl an Eingangsdaten benötigt wird. Aufgrund der Funktionsweise von neuronalen Netzwerken, ist es schwierig aus der Auswertung Zusammenhänge einzelner Parameter zu ermitteln, vielmehr liegen die Potenziale in der Ermittlung neuer Lösungsansätze. Die Stärken des Verfahrens liegen in seiner „Lernfähigkeit“, der Möglichkeit mit unterschiedlichen Skalenniveaus zu arbeiten und dass einer Untersuchung nicht a priori eine Hypothese zugrunde liegen muss. Demgegenüber

ist das Aufstellen eines Netzes komplex, da eine große Anzahl an Daten benötigt wird und der Lernvorgang sehr aufwendig ist. (Backhaus et al. 2015)

Bei den „k-nächste-Nachbar-Algorithmen“ handelt es sich um eine eher rustikale Methode, um die Werte von Zielgrößen zu schätzen. Dabei werden keine Abhängigkeiten zwischen den Daten untersucht, sondern der Fokus liegt auf den Prognosewerten. Der Algorithmus kann dabei Klassifikations- und Regressionsprobleme lösen. Das Ziel des Algorithmus ist es, aufgrund der Nachbarwerte herauszufinden, zu welcher bestehenden Kategorie ein neuer Punkt mit der größten Wahrscheinlichkeit gezählt werden kann. Es werden stets die nächsten gelegenen Nachbarn betrachtet, der Algorithmus berechnet dabei die einzelnen Punktabstände meist mittels der euklidischen Distanz. Mit dem Buchstaben k wird die Anzahl der Nachbarpunkte bezeichnet, mit denen der neue Punkt verglichen wird. Um eine größere Sicherheit zu erlangen, sollte dieser Wert >1 sein, aber auch nicht zu groß gewählt werden, um glättende Effekte zu vermeiden. Die Methode bietet den Vorteil, dass sie relativ leicht umzusetzen ist und vorab keine Hypothesen getroffen werden müssen. Allerdings werden die Systeme mit wachsenden Datensätzen immer langsamer und haben auch bei kleinen Datenmengen teilweise Probleme. Zudem können keine direkten Abhängigkeiten zwischen den Variablen untersucht werden. (Hude 2020)

Als geeignetstes Verfahren für diese Arbeit mit den vorliegenden Problemstellungen erscheint die logistische Regression mit den verschiedenen Ansätzen. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei der Regression um ein Schätzverfahren handelt, dass keine Kausalbeziehungen zwischen den einzelnen Variablen ermittelt und daher stets auch Abweichungen unterlegen ist. Da die oben genannten Fragestellungen in vielfältiger Weise in unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen auftreten und zentrales Element beispielsweise von betriebswirtschaftlichen Überlegungen ist, gibt es bereits eine Vielzahl an wissenschaftlichen Untersuchungen zu diesem Thema. In der Folge wird daher nur ein Überblick über die verwendete Methodik gegeben sowie die Gründe für Wahl des Verfahrens dargelegt. Für weiterführende Informationen zur theoretischen Herleitung, alternativen Verfahren und Anwendungsbeispiele sei an dieser Stelle auf die umfangreiche Literatur verwiesen. Standardwerke für Regressionsmodelle im Allgemeinen sowie zur multinominalen logistischen Regression im Speziellen sind im deutschsprachigen Raum (Backhaus et al. 2016) und (Fahrmeir et al. 2009) sowie im englischsprachigen Raum (Wright 1995), (Hair et al. 2014, 2010) und (Lemeshow et al. 2013).

Die Regression beschreibt die Korrelation zwischen zwei oder mehreren Variablen, wobei eine Variable abhängig sein muss und eine oder mehrere Variable unabhängig sind. Die abhängigen Variablen werden dabei als Kriterien bezeichnet, die unabhängigen als Prädiktoren. Das Verfahren ist sehr flexibel und kann auf die vorhandenen Variablen angepasst werden. Daher kommt es vielfach im Rahmen von statistischen Auswertungen zum Einsatz. Je nach Ausprägung der Variablen wird die Regression in

- Lineare Regression / Einfache Regression

- Multiple Regression
- Logistische Regression

unterteilt. (Backhaus et al. 2016; Hair et al. 2014, 2010)

Die Regressionsparameter b , beispielsweise in Gleichung (6), werden in der Praxis stets von Statistikprogrammen auf Grundlage der Eingangsparameter geschätzt. Hierfür kommt die Maximum-Likelihood-Methode zum Einsatz, welche die Regressionsparameter so schätzt, dass für Werte von oder nahe $y=1$ möglichst hohe Wahrscheinlichkeiten vorliegen und für Werte von oder nahe $y=0$ möglichst geringe Wahrscheinlichkeiten vorliegen. Für diese Doktorarbeit kam das Programm SPSS Statistics der Firma IBM zum Einsatz.

Die einfachste Form der Regression ist die lineare Regression, teilweise auch einfache Regression genannt. Mit ihr wird ausschließlich der Zusammenhang zwischen einer Variablen und einem Prädiktor dargestellt. Dieser Zusammenhang muss dabei linear sein und darf keiner etwa quadratischen Form folgen. Die lineare Regression liefert einen Erwartungswert einer Variablen in Abhängigkeit des Prädiktors, wie die Zahl verkaufter Einheiten für einen bestimmten Preis. Die Regressionsfunktion hat hier die Form einer linearen Funktion und wird folgendermaßen abgebildet (Backhaus et al. 2016):

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 * X \quad (6)$$

Mit

\hat{Y} = Schätzung der abhängigen Variablen Y

b_0 = konstantes Glied

b_1 = Regressionskoeffizient

X = unabhängige Variable

b_0 gibt dabei den Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der y -Achse an, während b_1 die Steigung der Regressionsgeraden beschreibt. Die Qualität der Schätzung der Regression wird mittels des Determinationskoeffizienten R^2 bestimmt, welcher nach der Methode der kleinsten Quadrate angibt, welchen Abstand die Datenpunkte zur Regressionslinie haben. Auch dieser Wert wird mittels Statistikprogrammen ermittelt. (Hua und Youn-Jeng, Choi, Qingzhou, Shi 2021; Backhaus et al. 2016)

Die multiple Regression, auch multiple lineare Regression genannt, ist eine Erweiterung der linearen Regression, falls es erforderlich ist, mehr als eine unabhängige Variable zu betrachten. Daher ist auch die Regressionsfunktion hier eine Weiterentwicklung von (6):

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 * x_1 + \dots + b_j * x_j + \dots + b_j * x_j \quad (7)$$

Die Qualität der Schätzung wird ebenfalls über den Determinationskoeffizienten ermittelt.

Die logistische Regression kommt zum Einsatz, wenn die abhängige Variable nur eine begrenzte Anzahl an klar definierten Zuständen annehmen kann, wie dies beispielsweise bei Fragebögen regelmäßig der Fall ist. Dabei wird unterschieden, ob die Variable nur zwei Zustände annehmen kann, etwa rot oder schwarz, dann spricht man von einer binären logistischen Regression, oder ob mehr als zwei Ausprägungen bei dem Kriterium möglich sind, dann ist es eine multinomiale logistische Regression. Dabei ist die Frage zentral, mit welcher Wahrscheinlichkeit welcher Zustand der Variablen gewählt wird. (Stoltzfus 2011) Da im Rahmen dieser Arbeit die multinomiale logistische Regression Anwendung findet, wird diese im Folgenden genauer erläutert, während für die binäre logistische Regression, welche sich sehr ähnlich verhält, auf die Literatur verwiesen wird.

Der Graph der logistischen Regression ist nun auch nicht mehr linear, sondern folgt der in Abbildung 40 dargestellten Form. Auf der x-Achse wird der Prädiktor abgebildet, während auf der y-Achse die Wahrscheinlichkeit des Kriteriums abgebildet wird. Dabei gilt, je steiler die Kurve der logistischen Regression, desto aussagekräftiger ist das Modell.

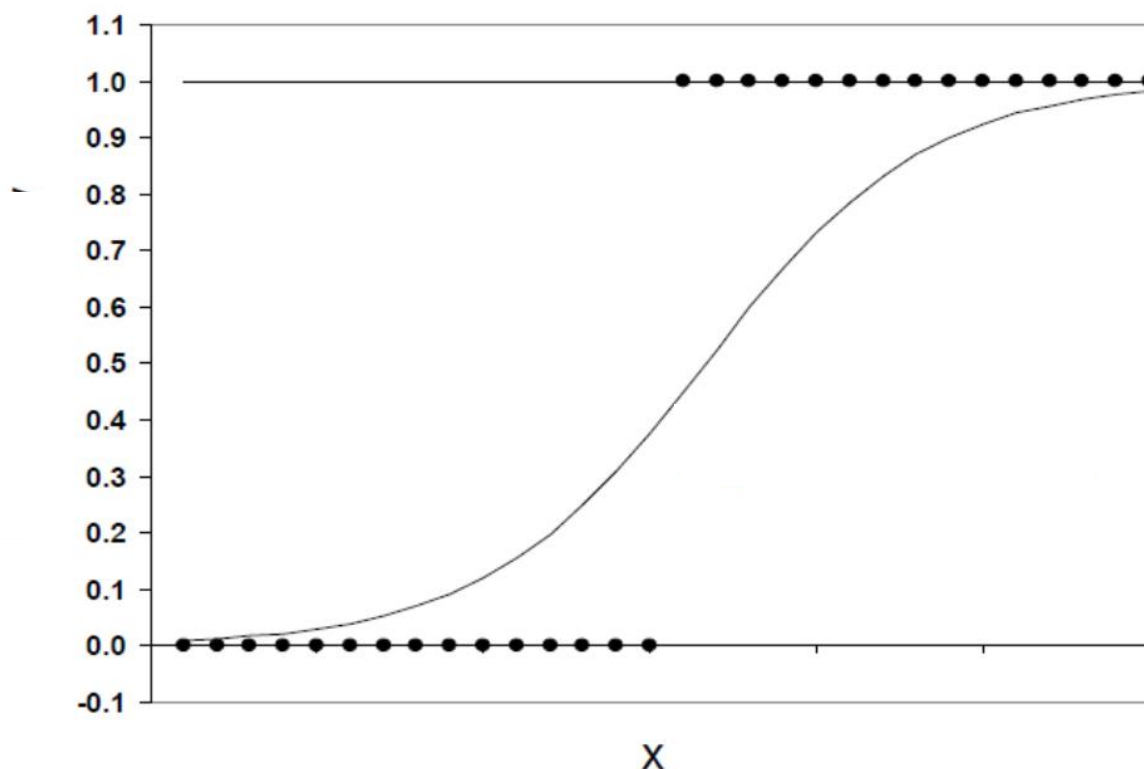


Abbildung 40: Graph multinomiale logistische Regression (DATAtab Team 2023)

Da bei der multinominalen Logistischen Regression die Eintrittswahrscheinlichkeiten der unterschiedlichen Ausprägungen der kategorialen Variable ermittelt werden, ergeben sich für die Formulierung der Regressionsgleichung folgende Rahmenbedingungen (Backhaus et al. 2016):

$$\sum_{g=1}^G \pi_g(x_k) = 1 \quad (8)$$

Dabei bezeichnet $g = 1, \dots, G$ die Ausprägungen (Kategorien), die eine multinominale Zufallsvariable annehmen kann, π_g ist die Eintrittswahrscheinlichkeit, welche in Abhängigkeit von x_k entsteht. Es gilt also, dass die Summe der Wahrscheinlichkeiten einer Zufallsvariablen immer 1 ergeben muss. Um die Wahrscheinlichkeiten der unterschiedlichen Kategorien zu ermitteln, wird stets eine der $1, \dots, G$ Kategorien als Referenzkategorie (baseline category) bestimmt. Häufig wird hier die letzte Kategorie G gewählt. Daraus ergeben sich für die Wahrscheinlichkeiten:

$$\pi_g(x) = \frac{e^{\alpha_g + \beta_{g1}x_1 + \dots + \beta_{gJ}x_J}}{\sum_{h=1}^G e^{\alpha_h + \beta_{h1}x_1 + \dots + \beta_{hJ}x_J}} \quad (g = 1, \dots, G) \quad (9)$$

Da sich nach Formel (8) die Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Kategorien zu 1 addieren und alle Werte auf eine Referenzkategorie beziehen, können die Parameter der Referenzkategorie auf 0 gesetzt werden. Für die Referenzkategorie, gilt daher

$$\pi_G(x) = \frac{1}{\sum_{h=1}^G e^{\alpha_h + \beta_{h1}x_1 + \dots + \beta_{hJ}x_J}} \quad (g = 1, \dots, G - 1) \quad (10)$$

Dabei bezeichnet β_{gJ} die Regressionskoeffizienten und α_g den sogenannten konstanten Term. Die Nomenklatur ist hier in der Literatur nicht konsistent, teilweise wird der konstante Term auch mit β_0 bezeichnet. Die Regressionskoeffizienten und der konstante Term werden jeweils mittels Statistikprogrammen ermittelt, unter Verwendung der Maximum-Likelihood-Methode. Zur Überprüfung des Gütemaßes kann erneut die Pseudo-R-Quadrat-Statistik herangezogen werden. Daneben gibt es noch die Möglichkeit unter anderem die Devianz zu ermitteln, Programme wie SPSS erledigen dies automatisch bei der Berechnung.

Die Maximum-Likelihood-Methode (MLM) ist aktuell die etablierteste Methode zur Abschätzung der Modellparameter. Ausgangspunkt der MLM ist dabei, dass eine ausreichend große Stichprobe einer konstanten Wahrscheinlichkeitsverteilung zugrunde liegt. In der Multinomialen Logistischen Regression wird davon ausgegangen, dass die abhängige Variable eine kategoriale Variable mit mehr als zwei Kategorien ist. Für jede dieser Kategorien gibt es eine eigene logistische Regression mit unterschiedlichen Modellparametern. Das Ziel der MLM ist es, die Wahrscheinlichkeiten zu schätzen, mit denen die abhängige Variable in jeder Kategorie beobachtet wird, gegeben den Werten der unabhängigen Variablen. Die

Modellparameter werden durch Maximierung der Likelihood-Funktion geschätzt, die die Wahrscheinlichkeit beschreibt, dass die beobachteten Daten aus der durch das Modell beschriebenen Wahrscheinlichkeitsverteilung gezogen wurden. Die Maximierung der Likelihood-Funktion erfolgt numerisch durch iterative Anpassung der Modellparameter, um die Wahrscheinlichkeit der Erzeugung der beobachteten Daten zu maximieren. (Agresti 2008)

Die Interpretation der Regressionskoeffizienten gestaltet sich bei der logistischen Regression komplexer als bei der linearen. Zwar gilt die Vorzeichenkonvention, dass positive Regressionskoeffizienten eine höhere Wahrscheinlichkeit bedeuten, während negative Regressionskoeffizienten eine geringere Wahrscheinlichkeit bewirken, allerdings verlaufen die Wirkungen dieser Werte nicht linear. Um die Werte interpretieren zu können, kommen sogenannte „Odds“ zum Einsatz. Diese bezeichnen den Quotienten aus den Wahrscheinlichkeiten, dass ein Ereignis eintritt und nicht eintritt.

$$\text{Odds} = \frac{P(y \text{ tritt ein})}{P(y \text{ tritt nicht ein})} \quad (11)$$

Zur Interpretation werden daraus sogenannte „Odds Ratios“ gebildet, welche das Verhältnis zweier Odds beschreiben.

$$\text{Odds Ratio} = \frac{\text{Odds nach dem Anstieg von } x \text{ um eine Einheit}}{\text{Odds vor dem Anstieg von } x \text{ um eine Einheit}} = \frac{\text{Odds}_{\text{nach}}}{\text{Odds}_{\text{vor}}} \quad (12)$$

Ist diese Odds Ratio größer 1, so steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Ereignis eintritt, mit größeren x-Werten an, während bei einer Odds Ratio kleiner 1 die Eintrittswahrscheinlichkeit sinkt. (Universität Zürich 2023)

3.3.2 Agentenbasierter Ansatz

Im Folgenden wird ein agentenbasierter Ansatz zur Nachfragemodellierung bei Managed Lanes entwickelt und vorgestellt. Die Ergebnisse wurden erstmals im Rahmen der ISFO 2023 vorgestellt (Schönhofer et al. 2023b). Der agentenbasierte Ansatz ermöglicht es für jede einzelne Person vorherzusagen, mit welcher Wahrscheinlichkeit diese ein Verkehrsmittel wählen wird. So ist es beispielsweise für Unternehmen möglich, die Wirkungen von Maßnahmen, beispielsweise von kostenlosen Parkplätzen für Fahrgemeinschaften oder Zuschüssen zu ÖPNV-Tickets, vorab abzuschätzen. Zudem können auf höherer Ebene die Effekte von bestimmten Maßnahmen abgeschätzt werden, wenn ausreichend Daten über die Verkehrsteilnehmer vorliegen.

Formulierung Nachfrage

Im Rahmen der Strukturgleichungsmodellierung in Kapitel 3.1.2 auf Grundlage der Umfrage in Kapitel 3.1.1, konnten sechs Faktoren ermittelt werden, die Einfluss auf die Wahl des Verkehrsmittels bei Pendlern haben. Darauf aufbauend wurde der folgende agentenbasierte

Modellierungsansatz entwickelt, der vorhersagt, mit welchen Wahrscheinlichkeiten sich Pendler für eine der folgenden Alternativen (Verkehrsmittel) entscheiden würden:

1. HOV-Lane: Fahrstreifen nur für hochbesetzte Fahrzeuge, ohne Kosten, aber mit Reisezeitgewinnen
2. HOT-Lane: Möglichkeit gegen eine Maut ebenfalls auf dem Sonderfahrstreifen zu fahren, auch bei einfach besetztem PKW
3. Regelfahrstreifen: Nutzung der verbleibenden Fahrstreifen, ohne Kosten jedoch mit Reisezeitverlusten verbunden (abgekürzt GPL für general purpose lane)
4. ÖPNV: ÖPNV darf Sonderfahrstreifen nutzen, die Annahme war, dass die Kosten denen einer einfachen PKW-Fahrt ohne Maut entsprechen, die Reisezeitgewinne der HOV-Lane genutzt werden können, aber Einbußen bei der Flexibilität hingenommen werden müssen

Die Ergebnisse wurden erstmals im Rahmen des 4th International Symposium on Freeway and Tollway Operations (ISFO 2023) in Wien vorgestellt (Schönhofer et al. 2023b).

Bei den sechs identifizierten Faktoren handelt es sich um die in Tabelle 3 gelisteten Einflussfaktoren, bei denen zusätzlich noch die jeweiligen Wertebereiche angegeben sind.

Tabelle 3: Einflussfaktoren Verkehrsmittelwahl (Schönhofer et al. 2023b)

Variable	Beschreibung	Wertebereich
x_1	Pendeldistanz	0: < 2 km, 1: 2 – 5 km, 2: 5 – 10 km 3: 10 – 30 km, 4: 30 – 50 km 5: > 50 km
x_2	Kosten	0, ..., 20 [€]
x_3	Reisezeitgewinne	0, ..., 20 [min]
x_4	Einkommen	0 – unterdurchschnittlich, 1 – durchschnittlich, 2 – überdurchschnittlich
x_5	Geschlecht	0 – männlich, 1 – weiblich
x_6	Alter	0: < 20 Jahre, 1: 20 bis 29 Jahre, ..., 4: > 50 Jahre

Aus den in Tabelle 3 genannten Einflussfaktoren sowie den 4 angebotenen Verkehrsmodi und der Anzahl an gewählten Tagen, welche in der Umfrage blockweise abgefragt wurden, bildet sich eine mehrdimensionale Formel. Damit ergibt sich für die Formulierung der Gleichung:

$$P_{m,d}(x) = \frac{e^{a_g + \beta_{g1} * x_1 + \dots + \beta_{g6} * x_6}}{\sum_{h=1}^6 e^{a_h + \beta_{h1} * x_1 + \dots + \beta_{h6} * x_6}} \quad (g = 1, \dots, 6) \quad (13)$$

In dieser Gleichung steht m für den gewählten Modus, d für die Anzahl der Tage und g/h für die jeweiligen Attribute. Der Wert α beschreibt den konstanten Term, während β die jeweiligen Regressionskoeffizienten bezeichnet.

Am Beispiel der HOV-Lane wird im Folgenden gezeigt, wie sich die Formeln zusammensetzen.

Die pauschale Wahrscheinlichkeit der Nutzung einer HOV-Lane unter bestimmten Voraussetzungen setzt sich zusammen aus dem Quotienten der einzelnen Nutzungswahrscheinlichkeiten π :

$$p_{HOV}(x) = \frac{\pi_{HOV}}{\pi_{HOV} + \pi_{HOT} + \pi_{GPL} + \pi_{ÖPNV}} \quad (14)$$

Wobei sich die Nutzungswahrscheinlichkeit π_{HOV} zusammensetzt aus den einzelnen Wahrscheinlichkeiten, wie oft ein Transportmodus gewählt wurde, multipliziert mit der durchschnittlichen Anzahl an Tagen, geteilt durch die Gesamtzahl der Tage.

$$\pi_{HOV}(x) = \frac{1,5 * p_{1,HOV} + 3,5 * p_{2,HOV} + 5 * p_{3,HOV}}{1,5 + 3,5 + 5} \quad (15)$$

Die Wahrscheinlichkeiten π für die weiteren Transportmodi errechnen sich analog.

Dabei errechnen sich die Wahrscheinlichkeiten, wie oft ein Modus für eine bestimmte Anzahl an Tagen gewählt wird aus der folgenden Formel:

$$p_{1,HOV}(x) = \frac{e_{1,HOV}}{1 + e_{1,HOV} + e_{2,HOV} + e_{3,HOV}} \quad (16)$$

Wobei die Zahlen 1, 2 und 3 die gruppierten Pendeltage angeben.

Die einzelnen Exponentialfunktionen speisen sich aus den konstanten Termen sowie den jeweils mittels SPSS ermittelten Regressionskoeffizienten:

$$e_1^{HOV} = e^{\alpha_{1,HOV} + \beta_{HOV,1,distance} * x_1 + \beta_{HOV,1,cost} * x_2 + \beta_{HOV,1,time} * x_3 + \beta_{HOV,1,income} * x_4 + \beta_{HOV,1,gender} * x_5 + \beta_{HOV,1,age} * x_6} \quad (17)$$

Im Zusammenspiel der Formeln (13) - (17) kann damit die Wahrscheinlichkeit ermittelt werden, wie viele Personen sich für welchen Verkehrsträger entscheiden würden.

Formuliert man nun aufgrund von Formel (13) die Ermittlung der Nachfrage aus, so ergibt sich ein Ausdruck, der aus 84 Termen besteht. Die einzelnen Regressionskoeffizienten sowie konstanten Terme sind nachfolgend in Tabelle 4 aufgeführt. Die zugehörigen x-Werte ergeben sich aus den Eigenschaften des jeweiligen Agenten. Es kann damit für jeden einzelnen Reisenden im Untersuchungsgebiet die Wahrscheinlichkeit der Verkehrsmittelwahl vorhergesagt werden.

Tabelle 4: Regressionskoeffizienten nach SPSS-Analyse (Schönhofer et al. 2023b)

		Konstanter Term α	Distanz β_1	Kosten β_2	Fahrtzeit β_3	Einkommen β_4	Geschlecht β_5	Alter β_6
HOT	0							
	1	-2,727	-0,06	-0,091	0,115	0,259	-0,1	0,022
	2	-4,826	-0,171	-0,152	0,188	0,114	0,034	0,103
	3	-4,133	-0,144	-0,105	0,122	0,193	-0,844	0,084
HOV	0							
	1	-1,301	-0,035	0,024	0,091	0,115	-0,031	-0,009
	2	-1,616	-0,109	0,039	0,112	-0,159	0,209	0,022
	3	-1,948	-0,023	0,054	0,126	-0,427	-0,001	-0,14
GPL	0							
	1	0,786	0,024	-0,001	-0,031	0,09	-0,092	-0,108
	2	2,1	0,03	-0,04	-0,176	-0,15	-0,68	0,075
	3	3,223	-0,172	-0,022	-2,878	0,07	-0,385	-0,025
ÖPNV	0							
	1	-1,323	-0,175	0,027	0,037	0,183	-0,011	0,009
	2	-0,052	-0,386	0,009	0,03	0,0119	-0,0077	-0,186
	3	-0,197	-0,362	0,038	0,07	-0,086	-0,032	-0,316

Nachdem die oben genannten Formeln für den agentenbasierten Ansatz im täglichen Gebrauch oder für grobe Vordimensionierungen zu umfangreich ist, wurde bei (Schönhofer et al. 2023b) auch ein vereinfachter Ansatz vorgestellt. Bei diesem wurde mittels einer Taylor-Approximation 2. Grades sowie einigen mathematischen Optimierungen die Zahl der Terme reduziert, was in Summe zu Abweichungen von bis zu 6,5 % führt. Die einzelnen Formeln zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten der Verkehrsmittelwahl sind im Folgenden dargestellt.

$$p_{HOT} = 0,0683 - 0,00595 * x_2 - 0,00132 * x_3 + 0,000366 * x_3^2 + 0,00173 * x_4 \quad (18)$$

$$p_{HOV} = 0,187 + 0,00121 * x_1 x_3 + 0,00474 * x_2 + 0,0168 * x_3 - 0,000507 * x_3^2 - 0,0272 * x_4 \quad (19)$$

$$p_{GPL} = 0,450 + 0,0172 * x_1 - 0,0175 * x_3 - 0,00442 * x_2 + 0,00173 * x_4 \quad (20)$$

$$p_{PT} = 0,403 + 0,00303 * x_2 + 0,00304 * x_3 - 0,0270 * x_6 - 0,0337 * x_1 \quad (21)$$

Sensitivitätsanalyse der Parameter

Die Parameter der Tabelle 4 weisen unterschiedlich starke Einflüsse auf die Verteilung der Wahrscheinlichkeiten der Verkehrsmittelwahl auf. Im Folgenden werden die Auswirkungen der einzelnen Parameter aufgezeigt, wenn alle anderen Parameter konstant bleiben. An dieser Stelle sei bereits betont, dass es sich bei den folgenden Abbildung 41 bis Abbildung 46 um die Auswirkungen der einzelnen Parameter auf die Formeln (18) bis (21) handelt und nicht um die Auswirkungen etwa der Pendeldistanz auf die Verkehrsmittelwahl. Dies ist bereits in Kapitel 3.1.1 sowie bei (Schönhofer und Bogenberger 2022) geschehen.

Die Pendeldistanz hat, wie in Abbildung 41 zu erkennen ist, einen erheblichen Effekt auf die Verkehrsmittelwahl. Die Teilnehmer wurden, wie in Tabelle 4 beschrieben, in Gruppen je nach der Anzahl der zurückgelegten Kilometer eingeteilt. In der unten stehenden Abbildung wurde diese Einteilung zugunsten der Übersichtlichkeit wieder aufgelöst. Es ist deutlich zu erkennen, dass längere Distanzen Verschiebungen im zweistelligen Prozentbereich auslösen können. Die größeren Distanzen haben zudem einen positiven Einfluss auf Fahrgemeinschaften sowie die Nutzung der Regelfahrstreifen und einen negativen Einfluss auf den ÖPNV. HOT werden nur in sehr begrenztem Umfang beeinflusst.

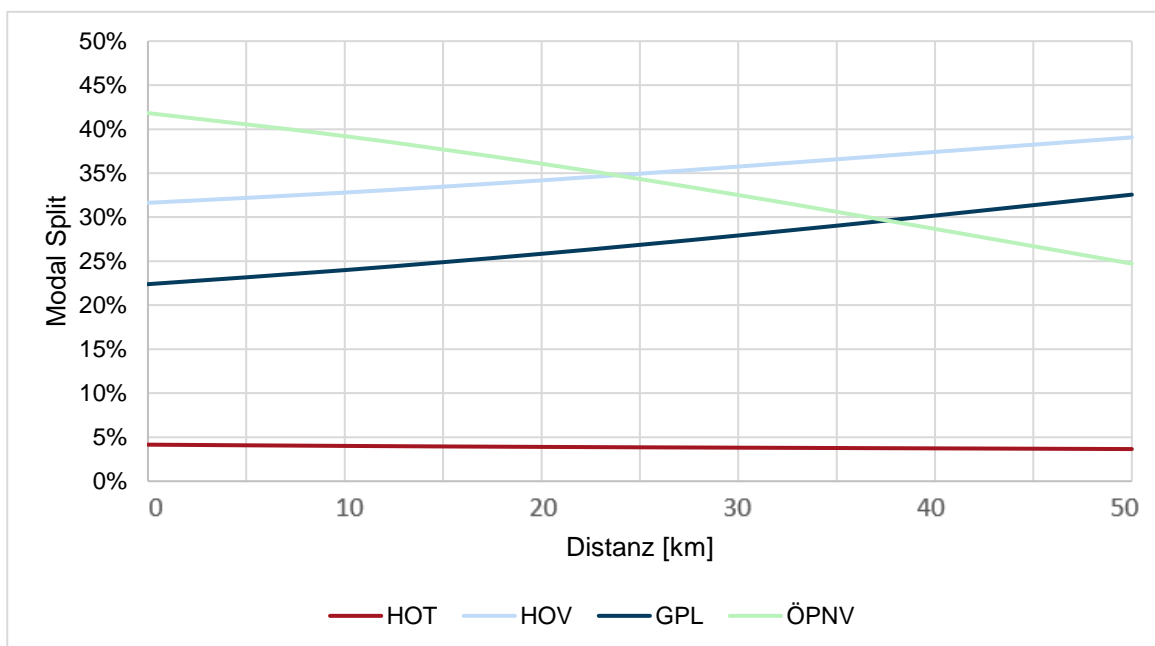


Abbildung 41: Auswirkung Pendeldistanz Modal Split

Die monetären Kosten spielen ebenfalls eine erhebliche Rolle bei der Wahl des Verkehrsmittels, wie Abbildung 42 zeigt. Die monetären Kosten beschreiben hier die Gebühren für die Benutzung einer Managed Lane. Der negative Einfluss auf die HOT-Lane sowie die Regelfahrstreifen sind deutlich ersichtlich. Zwar fallen für den Regelfahrstreifen keine direkten Kosten an, allerdings muss mit den verdrängten Nutzern der HOT-Fahrzeuge mit einer höheren Auslastung der Regelfahrstreifen gerechnet werden und damit potenziell mit Einbußen bei der Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs. Diese ausweichenden

Verkehrsteilnehmer nehmen die Fahrgemeinschaften sowie der ÖPNV auf, auf die steigende Kosten einen positiven Einfluss haben.

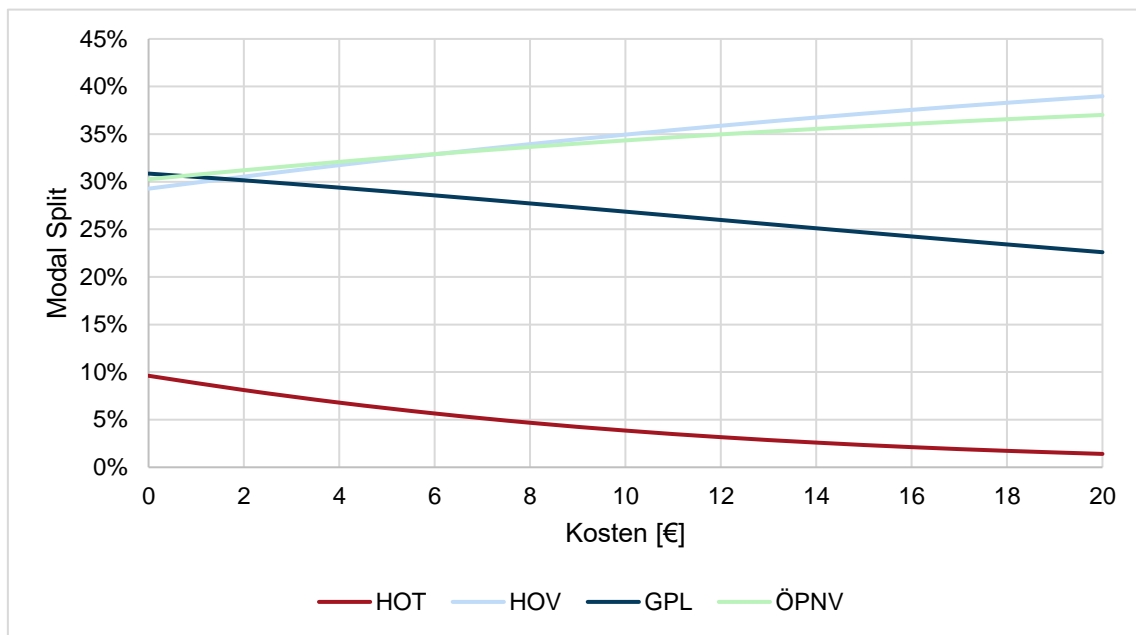


Abbildung 42: Auswirkungen Kosten auf Modal Split

Auch die erzielbaren Reisezeitgewinne spielen eine wichtige Rolle bei der Wahl des Verkehrsmittels. Abbildung 43 zeigt, dass mit zunehmenden Reisezeitgewinnen die Bereitschaft für die Nutzung der regulären Fahrstreifen und den damit einhergehenden Einbußen bei Reisezeit und Homogenität des Verkehrsflusses deutlich abnimmt. Höhere Reisezeitgewinne haben damit einen negativen Einfluss auf die GPL und einen positiven Einfluss auf alle anderen Transportmodi.

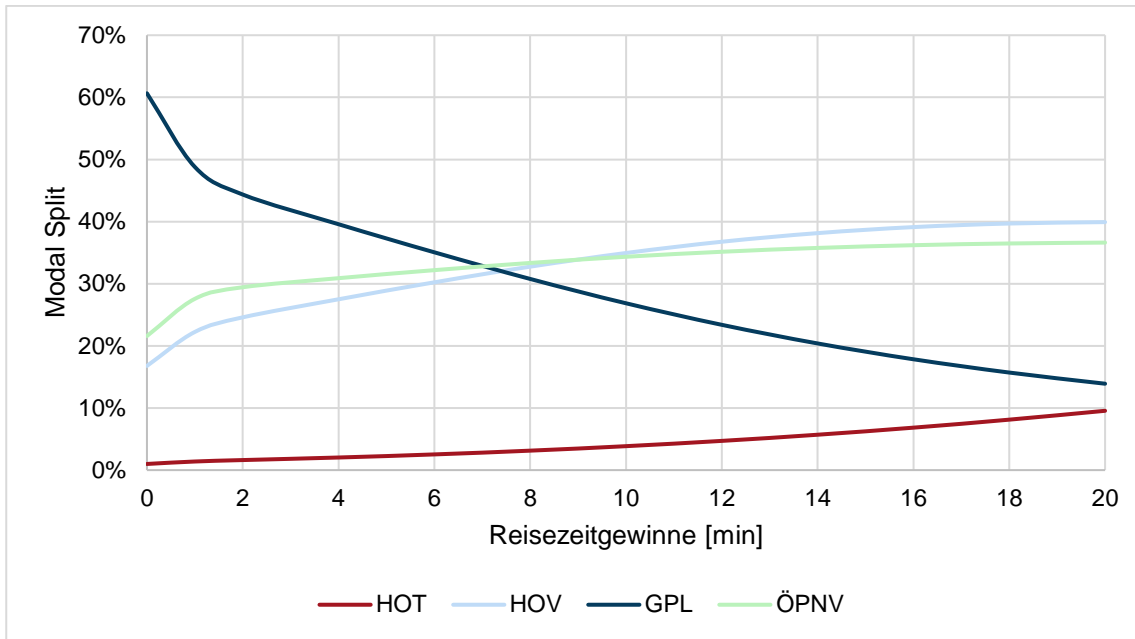


Abbildung 43: Auswirkung Reisezeitgewinne auf Modal Split

Im Vergleich zu den ersten drei Einflussfaktoren, sind die Auswirkungen des Einkommens nur mäßig stark ausgeprägt, wie Abbildung 44 zeigt. Das Einkommen wurde anhand von Einkommensgruppen von unterdurchschnittlich – 0 überdurchschnittlich – 1 auf überdurchschnittlich – 2 abgefragt, wobei zu beachten ist, dass diese Werte an keine absoluten Zahlen geknüpft sind, sondern die Teilnehmer der Umfrage aufgerufen waren, sich subjektiv einer dieser Gruppen zuzuordnen. Erwartungsgemäß hat ein höheres Einkommen einen positiven Einfluss auf die Bereitschaft für Privilegien einer HOT-Lane zu bezahlen, während die Bereitschaft zu warten oder eine Fahrgemeinschaft einzugehen sinkt. Interessanterweise steigt aber auch gleichzeitig die Bereitschaft, den ÖPNV zu nutzen. Dies könnte darin begründet sein, dass Menschen mit unterdurchschnittlich bezahlten Jobs öfter abgelegene Arbeitsstellen oder ungewöhnliche Arbeitszeiten haben, die die Nutzung von ÖPNV-Angeboten erschweren.

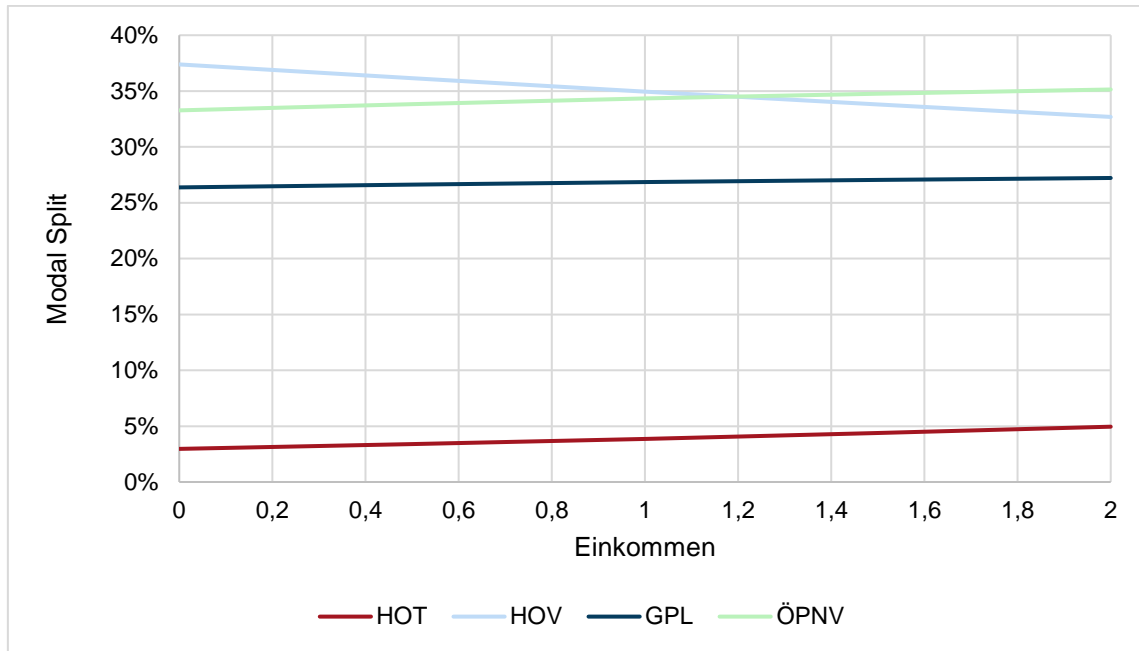


Abbildung 44: Auswirkung Einkommen auf Modal Split

Einen geringen Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl hat das Geschlecht, wie in Abbildung 45 deutlich wird. Mit 0 wird die Gruppe der männlichen Teilnehmer beschrieben, mit 1 die der weiblichen. Wie deutlich zu sehen ist, liegen die Abweichungen zwischen diesen beiden Gruppen jeweils unter 5 %, wobei Männer tendenziell eine höhere Neigung zur GPL haben, während Frauen einen leicht erhöhten Anteil an ÖPNV und Fahrgemeinschaften haben. Im Rahmen der Umfrage zeigte sich jedoch deutlich, dass Frauen hier unbedingt fixe Fahrgemeinschaften mit Menschen, die sie kennen bevorzugen und hierfür auch bereit sind, Einbußen bei der Flexibilität in Kauf zu nehmen.

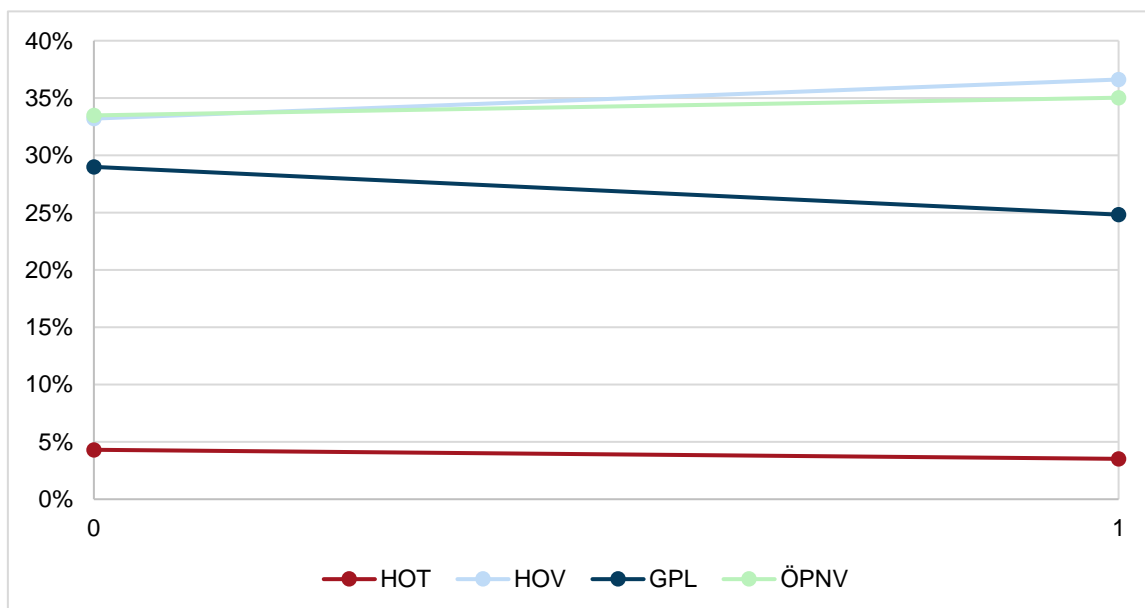


Abbildung 45: Einfluss Geschlecht

In Abbildung 46 wird der Einfluss des Alters auf die Formel der Verkehrsmittelwahl dargestellt. Die Teilnehmer wurden in Altersscheiden von 10 Jahren unterteilt, wobei die Gruppe 0 für die Teilnehmer unter 20 Jahren steht, die Gruppe 1 für diejenigen zwischen 20 und 30 Jahren, bis zur Gruppe 4, in welcher alle Teilnehmer, die älter als 50 Jahre sind, zusammengefasst werden. In den Daten ist mit dem Alter ein leicht positiver Einfluss auf die Bereitschaft, die HOT-Lane zu nutzen erkennbar, deutlich stärker ausgeprägt ist jedoch der negative Einfluss auf die Nutzung des ÖPNVs und die ansteigenden Werte für die GPL.

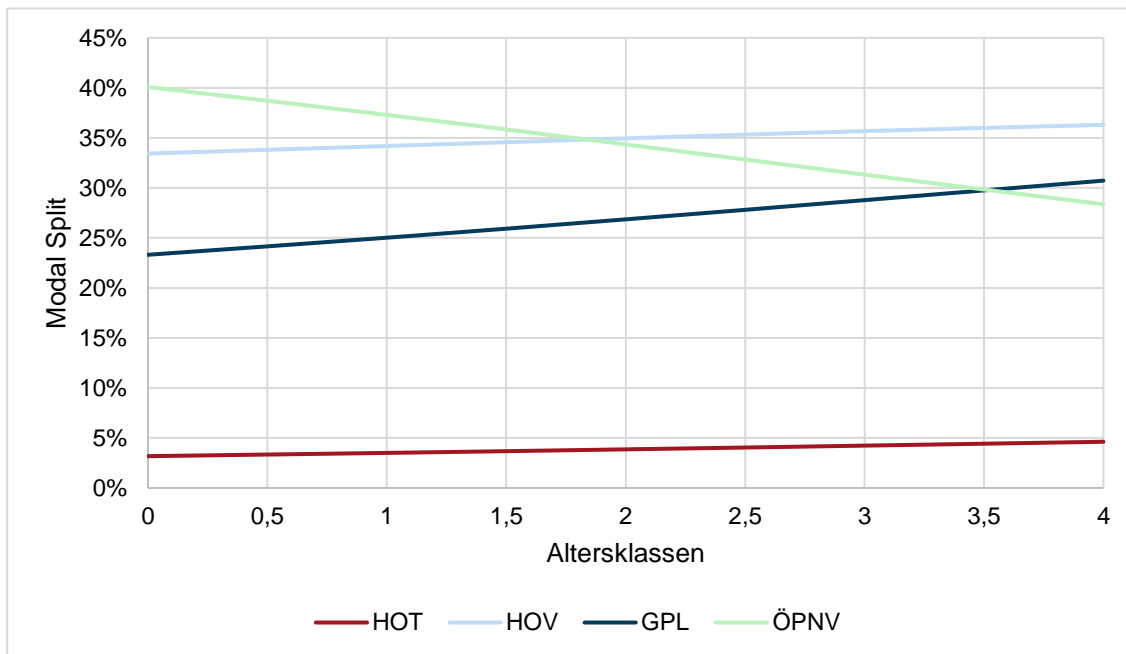


Abbildung 46: Einfluss Altersklassen

3.3.3 Gebietsbasierter Ansatz

Da die Formel für den agentenbasierten Ansatz aus Kapitel 3.3.2 mit 84 Termen sehr umfangreich ist und eine Vielzahl an Eingangsgrößen benötigt, ist sie für grobe Abschätzungen oder Voruntersuchungen, bei denen noch nicht ausreichend Daten vorliegen, nur bedingt geeignet. Zudem haben, wie Kapitel 3.3.2 zeigt, nicht alle Parameter die gleiche Relevanz für die Nachfrageermittlung. Aus diesen Gründen wird im Folgenden ein gebiets- oder quartiersbezogener Ansatz vorgestellt. Dieser wurde erstmalig ebenfalls bei (Schönhofer et al. 2023b) vorgestellt. Um dem in der Praxis häufig auftretenden Fall einer Vorabschätzung bestimmter Maßnahmen für bestimmte Gebiete und Quartiere bedienen zu können, werden nun einige Vereinfachungen vorgenommen. Hier gewinnen die „systemischen“ Einflüsse, wie die Reisezeit und die Reisekosten deutlich an Bedeutung, insbesondere, da auf diese Einfluss genommen werden kann, während die allgemeinen Rahmenbedingungen geringer gewichtet werden müssen.

Es ist davon auszugehen, dass in einer Kommune oder einem Quartier die Anzahl an Männern und Frauen etwa gleich groß ist. Der in Tabelle 3 als x_5 aufgeführte Faktor entfällt damit, ebenso alle damit verbundenen Regressionskoeffizienten und konstanten Terme.

Eine Untersuchung der Altersverteilungen in bayerischen und deutschen Kommunen ergab, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Kommunen und Quartieren überwiegend vernachlässigbar sind. Zwischen der jüngsten Stadt Regensburg mit knapp 42 Jahren und dem ältesten Landkreis in Bayern, Wunsiedel, mit knapp 47 Jahren (AdminStat 2023) (Urbistat 2023) liegen lediglich fünf Jahre. Bundesweit ist der Abstand zwischen Heidelberg mit etwas über 40 Jahren und Suhl mit 50 Jahren (Urbistat 2023) zwar fast ein Jahrzehnt, dies sind jedoch die absoluten Maximalwerte, so dass mit Ausnahme von Suhl alle Kommunen in Deutschland in der Stufe 3 der Kategorie x_6 nach Tabelle 3 liegen. Zudem ist die Altersverteilung in vielen Kommunen ähnlich, so dass in Verbindung mit Abbildung 46 auch hier bei der Betrachtung größerer Gebiete die Kategorie x_6 entfallen kann und zusammen mit den ihr verbundenen Regressionskoeffizienten und konstanten Terme nicht weiter betrachtet wird.

Auf Quartiersebene spielt der Faktor Einkommen ebenfalls eine untergeordnete Rolle. Zwar ist für die einzelne Person das verfügbare Haushaltseinkommen von höherer Bedeutung bei der Wahl des Verkehrsmittels, doch ist davon auszugehen, dass es innerhalb einer Kommune oder eines Quartiers stets von einem nivellierenden Effekt auszugehen, der die Einflüsse des Einkommens auf die Verkehrsmittelwahl betrifft. Damit wird auch der Faktor x_4 aus der Tabelle 3 hier nicht weiterverfolgt.

Damit verbleiben für die Formulierung der gebietsbezogenen Nachfrage die Terme x_1 – Pendeldistanz, x_2 – Reisekosten und x_3 – Reisezeitgewinne. Um die Formel weiter zu vereinfachen, wurde mittels Taylor-Approximation eine Verallgemeinerung für die vier betrachteten Verkehrsträger durchgeführt und diese anschließend mit dem Solver von Microsoft optimiert. Dabei wurde unter anderem die Zahl der Formeln für die Anzahl der Tage aus der Formel eliminiert und eine pauschale Formel für die Nutzungswahrscheinlichkeit gewählt. Die Anzahl an Termen konnte damit deutlich reduziert werden. Daraus ergeben sich folgende vier Formeln für die einzelnen Modi:

$$p_{HOT} = 0,0751 - 0,000738 * x_1 - 0,00432 * x_2 + 0,00461 * x_3 \quad (22)$$

$$p_{HOV} = 0,137 + 0,0161 * x_1 + 0,00491 * x_2 + 0,0101 * x_3 \quad (23)$$

$$p_{SOV} = 0,493 + 0,0194 * x_1 - 0,00377 * x_2 - 0,0181 * x_3 \quad (24)$$

$$p_{PT} = 0,279 - 0,0336 * x_1 + 0,00340 * x_2 + 0,00430 * x_3 \quad (25)$$

Da im Vergleich zur agentenbasierten Betrachtung mit den vorgenannten Formeln ein Verlust an Genauigkeit einhergeht, wurden die auftretenden Fehler berechnet, um die Qualität der Formeln zu testen. Zunächst wurden die Maximalwerte der Abweichung der agentenbasierten

Formel und der Quartiersformel verglichen. Im Ergebnis beträgt diese immer rund 5 % (HOT 4,1 %, HOV 4,6 %, GPL 5,2 %, PT 4,6 %), was bedeutet, dass die Werte zwischen den beiden Formeln maximal 5,2 % auseinander liegen. Im nächsten Schritt wurden dann die Durchschnittswerte der vier Modi gebildet und ebenfalls mit denen der Ausgangsformel verglichen. Hier sind die Abweichungen abermals deutlich geringer. Die größte Abweichung mit 3,1 % gibt es im ÖPNV, die anderen Werte liegen mit 2,5 % für HOT, 1,9 % für HOV und 2,7 % für GPL teilweise deutlich darunter. In Summe bewerten die Autoren diese Genauigkeit als ausreichend für die vereinfachte Betrachtung von Kommunen und Quartieren, da die Eingangsparameter bei größeren Betrachtungseinheiten in der Regel auch an Genauigkeit verlieren und mit Ungenauigkeiten aufgrund der Eingangsdaten gerechnet werden muss.

3.3.4 Eingangsparameter

Im Folgenden werden die wesentlichen Eingangsparameter der Verkehrssimulation dargestellt. Die genaue Kalibrierung erfolgt dann in Kapitel 4.

Fahrzeugtypen

Im Rahmen dieser Arbeit werden vier Fahrzeugtypen betrachtet. Der ÖPNV wird dabei als schienengebunden angenommen, da in der Praxis bisher nur in geringem Umfang Expressbusse die Autobahn nutzen.

PKW-Alleinfahrer (SOV):

PKW-Alleinfahrer (englisch single-occupancy vehicles SOV) sind Verkehrsteilnehmer, die allein in einem PKW sitzen und kein Interesse an Reisezeitgewinnen durch eine Managed Lane haben. Sie nutzen die regulären Fahrstreifen (GPL) und versuchen dabei ihre Wunschgeschwindigkeit, die etwa bei der Richtgeschwindigkeit auf deutschen Autobahnen von 130 km/h liegt, zu erreichen. Werden durch dichten Verkehr nur geringere Geschwindigkeiten erreicht, wird das in Kauf genommen. Die Antriebsart wird in dieser Untersuchung nicht weiter differenziert, da sie für den Platzbedarf und die Beförderungskapazität keine Bedeutung hat.

LKW:

Unter dem Fahrzeugtyp LKW werden alle Fahrzeuge zusammengefasst, deren Transportzweck bei Gütern liegt und nicht primär beim Personentransport. Darunter fallen Sattelzüge und Gespanne ebenso wie Sprinter und 7,5 t Transporter. Die Wunschgeschwindigkeit dieser Fahrzeuge wird vereinfachend mit 85 km/h angenommen, auch wenn insbesondere Sprinter in der Praxis in anderes Geschwindigkeitsprofil aufweisen. LKW sind von der Benutzung der Managed Lanes ausgeschlossen, auch wenn in Einzelfällen mehr als eine Person im Fahrzeug sitzt.

PKW-Fahrgemeinschaft (HOV):

Die Gruppe der PKW-Fahrgemeinschaft beschreibt Fahrzeuge (englisch high-occupancy vehicles), in denen mehr als eine Person sitzt und die deshalb berechtigt sind, HOV-Lanes und HOT-Lanes zu nutzen. Diese Fahrzeuge dürfen sämtliche Fahrstreifen nutzen und tun dies auch, um ihre Reisezeit zu optimieren. Die Wunschgeschwindigkeit liegt im Bereich der PKW-Alleinfahrer, also bei der Richtgeschwindigkeit, wobei diese Geschwindigkeit auch eingehalten werden soll.

PKW-Zahlungspflichtig (HOT):

Die PKW-Nutzer, die allein im Fahrzeug sitzen, aber bereit sind für die Nutzung der HOT-Lane Geld zu bezahlen (englisch high-occupancy tolled vehicles), werden in die Kategorie PKW-Zahlungspflichtig eingruppiert. Diese Gruppe nutzt die HOT-Lane, wenn ihr VOT größer ist als die aufgerufenen Nutzungsgebühren zum Befahren der Managed Lane. Die Wunschgeschwindigkeit liegt ebenfalls im Bereich von 130 km/h. Wird die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen normalen Fahrstreifen und Managed Lane groß genug, dass sich der Wechsel des Fahrstreifens entsprechend dem VOT lohnt, so wird dieser vorgenommen, ansonsten werden Geschwindigkeitseinbußen in Kauf genommen.

Streckennetz

Im Rahmen dieser Dissertation werden zwei Streckennetze betrachtet. Zunächst wird ein synthetisches Streckennetz nach Vorbild des HBS untersucht. Dabei handelt es sich um einen Autobahnabschnitt mit ca. 15 km Länge, welcher vier Anschlussstellen und zwei Autobahndreiecke beinhaltet. In Summe gibt es damit sechs Knotenpunkte und sieben Streckensegmente. Das Streckenprofil ist zweibahnig sechsstreifig, jede Richtungsfahrbahn hat also drei Fahrstreifen.

Auslastung

Im Rahmen der Simulationen werden im synthetischen Streckenzug verschiedene Auslastungsgrade untersucht. Ausgangspunkt ist zunächst eine durchschnittliche Verkehrsbelastung, bei der die Verkehrsmenge angesetzt wird, bei der nach HBS die Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs D (QSV D) beträgt. Das bedeutet, dass der Verkehrszustand noch stabil ist, aber bereits ein hohes Maß an Interaktion zwischen den Verkehrsteilnehmern stattfindet und schon leichte Beeinträchtigungen in der Bewegungsfreiheit vorhanden sind (FGSV 2015).

Als zweiter Lastfall wird eine hohe Verkehrsmenge von 120 % der QSV D angenommen. Dies wird in der Praxis zu sehr dichtem Verkehr in der Strecke führen und vermutlich bereits zu vereinzelt Stauereignissen infolge einer Überlastung.

Als dritte Belastungsstufe wird eine gering belastete Autobahn angenommen, bei der die Verkehrsmenge 80 % der QSV D beträgt. In der Praxis wird dies zu einem leichteren

Verkehrsfluss führen und möglicherweise einer QSV C. Da in den unterschiedlichen Fällen aber unterschiedliche Verkehrsmengen vorherrschen und die QSV nicht zentrales Thema dieser Dissertation sind, wird auf die genaue Bestimmung verzichtet.

Induzierter Verkehr

Das Thema des induzierten Verkehrs ist komplex und in der Fachwelt durchaus umstritten (ECMT 1998). Um eine insgesamt belastbare Aussage zu einem möglicherweise induzierten Verkehr treffen zu können, müssen sechs Teilaspekte berücksichtigt werden, die (Cerwenka und Hauger 2003) wie folgt definieren:

- Ersatz von zu Hause bleiben durch eine Fahrt auf oder mit dem neuen Angebot
- Kleinräumige Routenverlagerung unter Beibehaltung des Verkehrsmittels
- Fahrtverlängerung
- Großräumige Routenverlagerung bei Beibehaltung des Verkehrsmittels
- Modale Verlagerung
- Zielverlagerung mit demselben Verkehrsmittel

In der Praxis sind Aussagen zu diesen Aspekten jedoch sehr schwer möglich und auch in der Erhebung komplex sowie aufwendig. Dies liegt daran, dass selten nur eine Maßnahme in einem Untersuchungsraum zur gleichen Zeit realisiert wird und allgemein Untersuchungsräume und Einflussphasen nur schwer voneinander abgegrenzt werden können. Es bleibt häufig die Frage offen, ob es sich um „neuen“ induzierten Verkehr handelt oder ob nur Verkehr räumlich oder modal verlagert wurde. (Köll und Axhausen 1996)

In einem im ITE Journal 2001 (Litman 2001) erstmals veröffentlichtem und 2023 aktualisierten Artikel wertet (Litman 2023) eine Reihe von realisierten Projekten aus und ordnet diese bezüglich des induzierten Verkehrs ein. Auf dieser Grundlage wird für diese Dissertation ein fixer Wert für induzierten Verkehr in Höhe von 2,5 % der Summe der Fahrgemeinschafts- und ÖPNV-Nutzer festgelegt.

Zeitlicher Rahmen

Im Rahmen der Arbeit wird die morgendliche Spitzenstunde betrachtet und ausgewertet. Dies geschieht nur für die belastete Fahrtrichtung.

Szenarien

Für die Simulationen werden Szenarien über zwei Variablengruppen gebildet. Zum einen ändert sich die Menge der Verkehrsnachfrage und zum anderen ändert sich der Kostensatz zur Benutzung der HOT-Lane. Die Verkehrsmenge schwankt zwischen den Fällen Niedrig – Durchschnittlich – Hoch und die Kostensätze bewegen sich zwischen 0,1 €/km und 1,0 €/km.

4. Mikroskopische Simulation einer HOT-Lane anhand eines synthetischen Streckennetzes nach HBS

Die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Simulationen wurden mit der Software Aimsun Next 22.0.2 der Firma Yunex erzeugt. Yunex wurde als Tochter von Siemens gegründet und im Jahr 2022 dann an die Atlantia S.p.A. verkauft (Siemens 30.06.2022).

Ziel der in diesem Kapitel geplanten Simulationen ist es, die Auswirkungen einer HOT-Lane auf einen Autobahnabschnitt zu untersuchen. Hierzu kommt der in Kapitel 3.3 entwickelte gebietsbasierte Ansatz zur Nachfrageschätzung auf einer HOT-Lane zum Einsatz. Durch die Simulationen, die mit verschiedenen Variationen der Eingangswerte in den unterschiedlichen Szenarien durchgeführt werden, sollen unter anderem die Veränderungen im Modal Split, der Reisezeit und der Emissionen untersucht werden.

Für jedes Szenario wurden mindestens 10 Simulationsläufe zur Gewinnung von Daten durchgeführt, so dass den Vorgaben aus (FGSV 2006) entsprochen werden kann. Bei den Szenarien handelt es sich um die verschiedenen Kostensätze pro km, welche von HOT-Fahrzeugen entrichtet werden müssen, sowie in den synthetischen Szenarien die unterschiedliche Stärke der Nachfrage. Als Kostensätze der Streckennutzungsgebühr werden in dieser Untersuchung die Stufen 0,1 €/km, 0,25 €/km, 0,5 €/km, 0,75 €/km und 1 €/km betrachtet. Diese sind über die verschiedenen Nachfragemengen immer gleich und werden für alle folgenden Kapitel betrachtet. Für die Berechnung der Fahrkosten wird die Streckenlänge zwischen Einfahrtspunkt und Ausfahrtstelle herangezogen. Es spielt also keine Rolle, ob das Fahrzeug öfter die Spur wechselt und damit eine längere Strecke zurücklegt oder ob es auf der streckentechnisch kürzesten Ideallinie fährt. Im Rahmen der Auswertung wird durch Interpolation versucht, auch für die Zwischenräume belastbare Ergebnisse aufzeigen zu können. Zudem wurde ein Basisszenario als „0-Fall“ simuliert und wird als Referenz herangezogen, um die Auswirkungen der Managed Lane zu bewerten.

Um die Ergebnisse möglichst allgemeingültig präsentieren zu können, liegt den Simulationen zunächst ein synthetisches Verkehrsmodell zugrunde, um die Auswirkungen der Untersuchungen zu zeigen. Erste Ergebnisse für das Szenario 100 % QSV D nach HBS wurden im Rahmen der TRB 2024 vorgestellt (Schönhofer et al. 2024). Als weitere Szenarien werden ein Fall mit einer Auslastung von 80 % der QSV D und ein Szenario mit einer Auslastung von 120 % der QSV D herangezogen. In der Praxis dürften diese Änderungen der Verkehrszahlen zu einer Änderung der Qualitätsstufen nach HBS in C und E führen, da dies für die weitere Betrachtung jedoch nicht relevant ist, wird zugunsten einer besseren Verständlichkeit im Weiteren mit den Prozentwerten gearbeitet.

4.1 Aufbau der Simulation

Das Streckennetz lehnt sich an ein Beispielnetz im deutschen HBS 2015 (FGSV 2015), siehe Abbildung 47, an. Dabei handelt es sich um einen rund 18 km langen Streckenzug, der in den Punkten A und B zwei Autobahndreiecke beinhaltet und dazwischen vier Anschlussstellen 1 – 4, die in unregelmäßigen Abständen die Strecke schneiden.

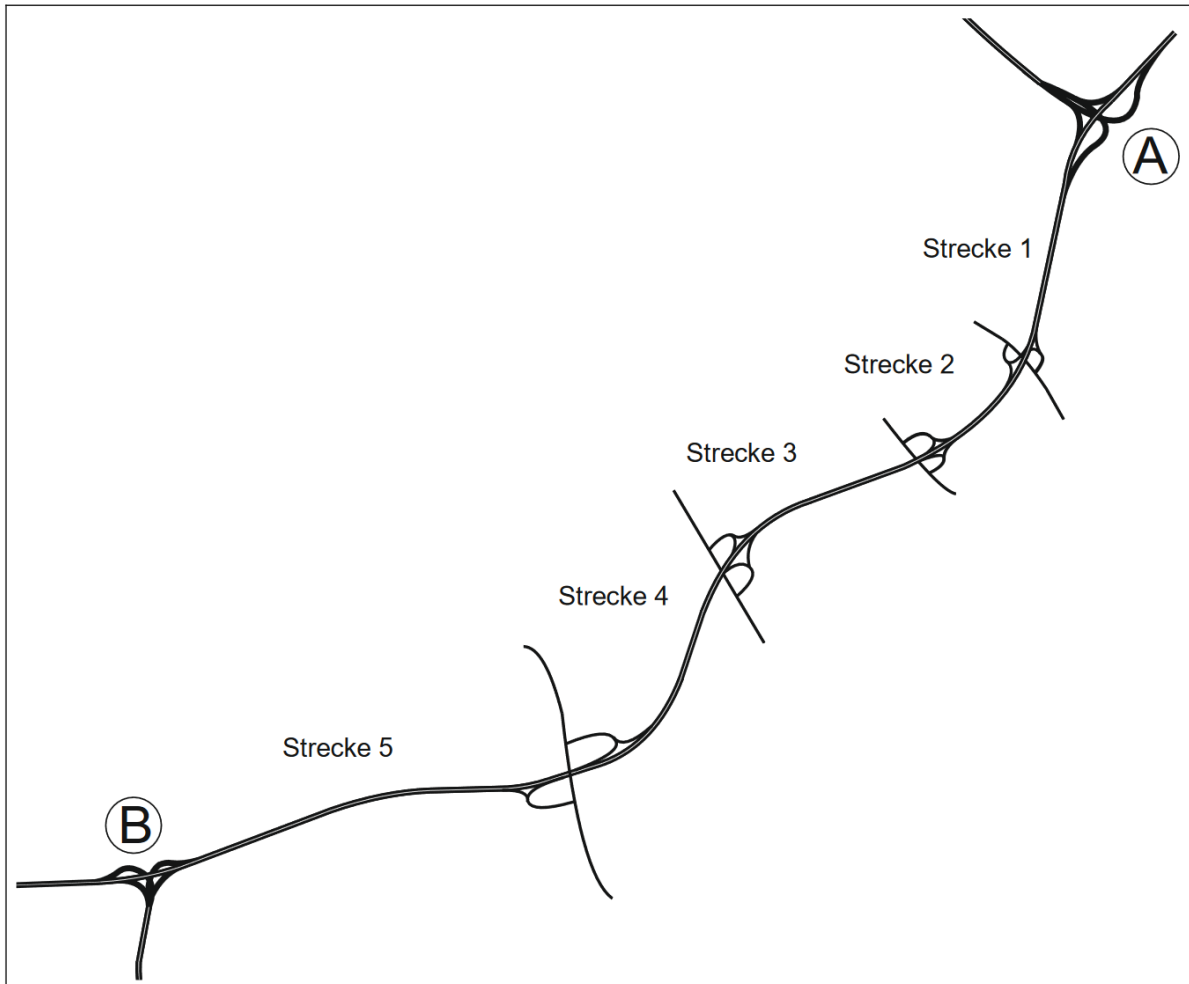


Abbildung 47: Synthetisches Referenznetz nach HBS (FGSV 2015)

Für die vorliegende Dissertation wurde das Netz und vor allem die Notation etwas angepasst. Anstatt der Autobahndreiecke werden hier die Anfangs- und Endbereiche des Simulationsnetzes mit A und B bezeichnet, während die beiden Autobahndreiecke simulationstechnisch weiter enthalten sind, sich jedoch in die Notation der Anschlussstellen einfügen. Das verwendete Streckennetz der Simulation ist in Abbildung 48 dargestellt. Hier beschreiben nun die Knoten 1 und 6 die Autobahndreiecke, während die Knoten 2 bis 5 die Anschlussstellen kennzeichnen. Die Längen der einzelnen Streckensegmente sind am oberen Bildrand vermerkt.

Anschlussstellen auffahren. Der Wert A beschreibt die Menge an Fahrzeugen, die vor dem Autobahndreieck 1 in die Strecke einfährt, in der Spalte B sind die Fahrzeuge angegeben, die das Netz hinter dem Autobahndreieck 6 verlassen. In der dunkelgrau hinterlegten Spalte rechts ist angegeben, wie viele Fahrzeuge an der jeweiligen Anschlussstelle oder Autobahndreieck einfahren. Die Prozentzahl bezieht sich dabei auf die Anzahl der im vorherigen Streckensegment befindlichen Fahrzeuge. Im Gesamtsystem werden damit einige Vereinfachungen angenommen. Zum einen wird angenommen, dass die Aufteilung der verschiedenen Verkehrsträger an jeder Anschlussstelle konstant ist und nicht beispielsweise HOV bevorzugt eine bestimmte Anschlussstelle anfahren. Den Fahrzeugtypen HOV und HOT werden die gleichen Eigenschaften zugeschrieben, auch wenn in der Praxis HOT Fahrzeuge zu höheren Geschwindigkeiten tendieren. Zudem wird der Anteil an Schwerverkehr konstant über die komplette Strecke angenommen.

Tabelle 5: Relative Quell-Ziel-Matrix

	1 ab	2 ab	3 ab	4 ab	5 ab	6 ab	B ab	Belastung der Knoten in Abhängigkeit der Netzbelastung
A zu	5 %	4 %	9 %	2 %	2 %	4 %	73 %	100 %
1 zu		31 %	32 %	11 %	6 %	8 %	11 %	11 %
2 zu			62 %	9 %	4 %	18 %	7 %	9 %
3 zu				26 %	22 %	17 %	34 %	15 %
4 zu					14 %	51 %	35 %	14 %
5 zu						31 %	69 %	12 %
6 zu							100 %	12 %

Zur Verdeutlichung der Quell-Ziel-Beziehung in Tabelle 5 ist in Tabelle 6 beispielhaft für den Basisfall die Quelle-Ziel-Matrix in absoluten Personen in der morgendlichen Spitzenstunde angegeben. Ausgangspunkt sind hier 7.300 Reisende, die bei A in das System fahren wollen. Darin ist noch kein Schwerverkehr enthalten, allerdings Fahrgemeinschaften und induzierter Verkehr. Die einzelnen Quell-Ziel Beziehungen teilen sich dann auf die unterschiedlichen Transportmodi auf.

Tabelle 6: Absolute Quell-Ziel-Matrix für den Basisfall [Personen/h]

	1 ab	2 ab	3 ab	4 ab	5 ab	6 ab	B ab
A zu	365	292	657	146	146	292	5.329
1 zu	-	253	261	90	49	65	90
2 zu	-	-	391	57	25	114	44
3 zu	-	-	-	279	236	182	365
4 zu	-	-	-	-	147	535	367
5 zu	-	-	-	-	-	277	616
6 zu	-	-	-	-	-	-	872

Die Verteilung innerhalb der Quell-Ziel-Matrix in Tabelle 5 wurde mit Zufallszahlen vorgenommen. Die relative Quell-Ziel-Matrix bleibt dabei über sämtliche Simulationsläufe konstant, so dass sich durch Verkehrsverlagerungen zwar unterschiedliche Verkehrszahlen bei den einzelnen Verkehrsträgern ergeben können, diese aber immer mit der oben dargestellten Verteilung fahren. Aus den oben genannten Zahlen ergeben sich unterschiedliche Belastungsgrade für die verschiedenen Streckenabschnitte. Die größte Belastung findet sich im Abschnitt zwischen den Anschlussstellen 3 und 4, was in den späteren Auswertungen auch deutlich sichtbar wird. Zwischen den Anschlussstellen 1 und 2 nimmt der Verkehr etwas ab, so dass dort weniger Fahrzeuge im System sind. Diese unterschiedlichen Belastungsstufen wurden bewusst gewählt, um ein möglichst breites Bild in den Auswertungen zu erhalten.

Die Aufteilung der Verkehrsmittelwahl erfolgt anhand der Formeln, die im Rahmen des Kapitels 3.3.3 vorgestellt und bei (Schönhofer et al.2023) erstmals veröffentlicht wurden. Diese werden im Folgenden nochmals kurz dargestellt. Allerdings wird für deren Herleitung auf das veröffentlichte Paper verwiesen. Es kommen die vereinfachten gebietsbasierten Formeln zum Einsatz und nicht die detaillierten agentenbasierten Formeln. Dies ist darin begründet, dass es sich um einen synthetischen Streckenzug mit synthetischer Nachfrage handelt. Diese sind zwar an reale Vorbilder angelehnt, aber entsprechen ihnen nicht vollständig. Durch den agentenbasierten Ansatz müssten jedem Fahrzeug deutlich genauere Attribute zugewiesen werden, was eine im synthetischen Netz nicht darstellbare Genauigkeit suggerieren würde.

$$p_{HOT} = 0,0751 - 0,000738 * x_1 - 0,00432 * x_2 + 0,00461 * x_3 \quad (262)$$

$$p_{HOV} = 0,137 + 0,0161 * x_1 + 0,00491 * x_2 + 0,0101 * x_3 \quad (273)$$

$$p_{SOV} = 0,493 + 0,0194 * x_1 - 0,00377 * x_2 - 0,0181 * x_3 \quad (284)$$

$$p_{PT} = 0,279 - 0,0336 * x_1 + 0,00340 * x_2 + 0,00430 * x_3 \quad (295)$$

Der Wert x_1 beschreibt dabei geclustert die Reisedistanz, x_2 steht für die aufgerufenen Mautkosten und x_3 gibt die Reisezeitgewinne an, die durch die Nutzung einer Managed Lane erzielt werden können.

Zusammengefasst kommt ein synthetisches Verkehrsmodell, unter folgenden Annahmen zum Einsatz:

- Die Startzahl der Reisenden, die sich dann auf ÖPNV, SOV, HOT und HOV aufteilt, beträgt 7.300 Personen.
- Schwerverkehrsanteil konstant bei 10 % der Ausgangsverkehrsbelastung.
- Alle Pendler im System legen eine Strecke von insgesamt zwischen 10 und 30 km zurück, davon aber nur Teile auf dem betrachteten Autobahnteilstück.
- Für Pendler, die sich zusammenschließen und Fahrgemeinschaften bilden, sowie auf den ÖPNV ausweichen, gibt es einen induzierten Verkehr in Höhe von 2,5 %, der die Strecke in Form von SOV zusätzlich belastet. Die Aufteilung hinsichtlich der Quell-Ziel-Beziehungen bleibt gleich.
- ÖPNV-Nutzer verwenden schienengebundene Verkehrsmittel oder alternative Routen und treten damit nicht auf dem betrachteten Streckenabschnitt in Erscheinung.

4.3 Kalibrierung und Validierung des Modells

Das Modell wurde durch die Konsolidierung des Basis-Szenarios kalibriert. Um eine solide Grundlage für das Modell zu schaffen, wurden umfangreiche Verkehrsdaten aus der realen Welt (Statista 2023a) genutzt. Hierbei kamen allgemeine Daten des Statistischen Bundesamts sowie detaillierte Informationen wie Detektordaten zum Einsatz. Die Daten umfassten Verkehrsstärken, Fahrzeugtypen und Geschwindigkeiten. Diese Informationen wurden anschließend in ein Straßennetz integriert, das dem Deutschen Handbuch für Straßenverkehrskapazität (HBS) (FGSV 2015) nachempfunden war.

Darauf aufbauend wurden mikroskopische Verkehrsflusssimulationen durchgeführt und analysiert. Basierend auf den verfügbaren Informationen und den Simulationsergebnissen wurden die Parameter der Simulation angepasst, um eine realistische Darstellung des Verkehrs zu erreichen. Als realistisch werden dabei Fahrverhalten angesehen, die auch im realen Straßenverkehr erwartet werden können, insbesondere wenn es um Verflechtungs- und Überholvorgänge geht. Diese Parameter umfassen Fahrzeugdynamik, Fahrerverhalten und

Abstände zwischen Fahrzeugen. Zusätzlich wurden geringfügige Optimierungen am Straßennetz im Bereich der Beschleunigungs- und Verzögerungstreifen vorgenommen.

Dieser Prozess wurde mehrfach iterativ wiederholt, auch für verschiedene Szenarien, bis eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen realen Daten und Simulationen für verschiedene Verkehrsindikatoren wie Verkehrsstaus, Durchschnittsgeschwindigkeit und Reisezeiten erreicht wurde. Dies führte zu einem konsistenten Modellentwurf, der, ähnlich wie das HBS, eine einfache Übertragbarkeit auf andere Verkehrssituationen ermöglicht.

Die Validierung erfolgte abschließend mit einem weiteren Referenzdatensatz, für den die zu erwartenden Auswirkungen auf das Streckennetz bekannt waren.

Die Simulationen konzentrierten sich auf die Hauptverkehrszeit. Zunächst wurde eine einstündige Hochlaufphase simuliert, gefolgt von der Hauptverkehrszeit und dann einer Abklingphase. Für die Auswertung wurden nur Fahrzeuge berücksichtigt, die zwischen der ersten und zweiten Stunde in das System eingetreten waren.

4.4 Szenarien

Im Folgenden werden die verschiedenen Lastfälle miteinander kombiniert. Zur leichteren Lesbarkeit werden die verschiedenen Simulationsläufe nach der Verkehrsbelastung gruppiert.

4.4.1 Basis-Szenario

Das Basis-Szenario bildet die Grundlage für die Bewertung der unterschiedlichen Szenarien. In dieser Ausgangssituation existiert noch keine Managed Lane, sondern der Querschnitt mit drei Fahrstreifen pro Fahrtrichtung steht noch allen Fahrzeugen zur Verfügung. Dabei nutzen LKW hauptsächlich den rechten und gelegentlich den mittleren Fahrstreifen, während PKW, unabhängig davon, ob sie nur mit einer Person oder einer Fahrgemeinschaft besetzt sind, alle Fahrstreifen nutzen können und insbesondere für schnellere Fahrten auch auf den linken Fahrstreifen ausweichen. Aufgrund der fehlenden HOT-Lane gibt es im Basis-Szenario nur die Fahrzeugtypen PKW-Alleinfahrer (SOV), Schwerverkehr und Fahrgemeinschaften (HOV). Betrachtet man die Geschwindigkeitsprofile, sind diese für die Fahrzeugtypen SOV und HOV quasi identisch, die Abweichungen bewegen sich im Sekundenbereich und sind Schwankungen in den Simulationen geschuldet.

Im Ausgangs- oder Basis-Szenario ist der Modal Split, wie in Abbildung 49 dargestellt deutlich von einfach besetzten PKW dominiert. Diese Ausgangswerte decken sich auch mit allen bekannten Zahlen zum aktuellen Modal Split unter deutschen Pendlern, z. B. bei (Statista 2023c; Heinitz 2020; Gerike 2023), wobei es im Einzelnen zu Abweichungen im Prozentbereich zwischen verschiedenen Untersuchungen kommen kann. Die sehr glatten Werte von 70 % Alleinfahrern, 20 % ÖPNV-Nutzern und 10 % Fahrgemeinschaften wirken auf

den ersten Blick gerundet, sind jedoch auf drei Nachkommastellen genau gerechnet und sind in dieser Form das Ergebnis der Berechnungen (69,7 % SOV, 10,4 % HOV, 19,9 % ÖPNV)

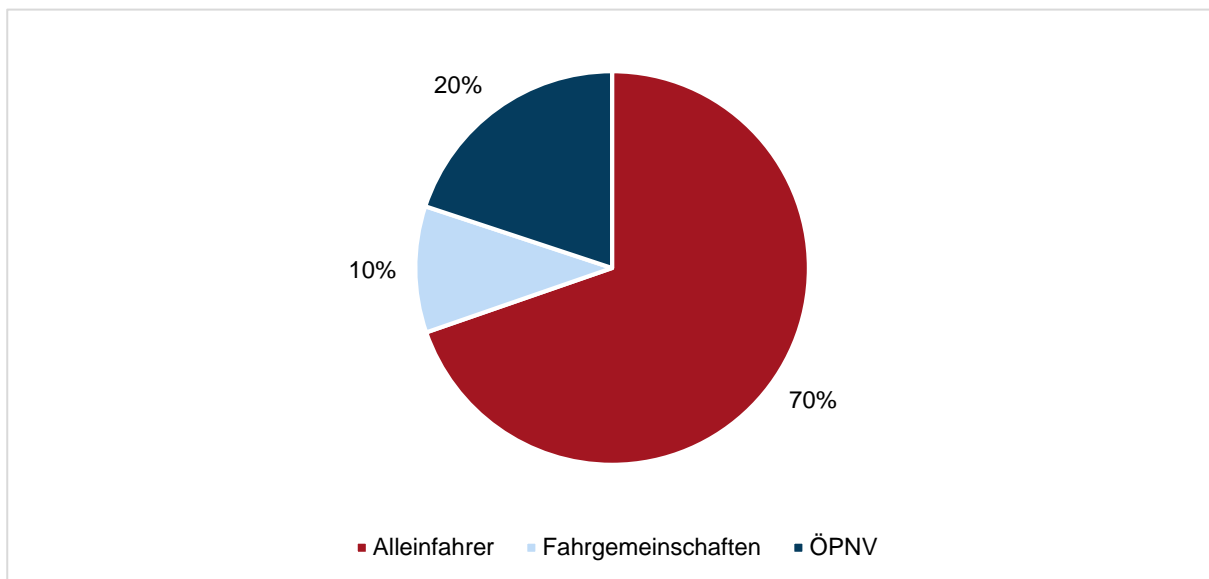


Abbildung 49: Modal Split Basis-Szenario

In Tabelle 7 sind die durchschnittlichen Reisezeiten im Basis-Szenario für PKW, die hier stellvertretend für alle Individualverkehre stehen sowie den Schwerverkehr aufgeführt. Hier zeigt sich bereits, dass dichter Verkehr und kurze Strecken auf der Autobahn nur zu geringen Reisezeitunterschieden führen, auch wenn die Wunschgeschwindigkeiten von PKW-Fahrern und LKW-Fahrern gemäß den Rahmenbedingungen der Simulation ca. 40 km/h auseinander liegen.

Bei den Werten in Tabelle 7 handelt es sich um Durchschnittswerte. Diese können insbesondere bei kürzeren Streckenabschnitten um bis zu 100 % variieren. Je kürzer die Strecke, umso stärker fallen Behinderungen oder ungewöhnlich freie Streckenabschnitte durch Einzelereignisse ins Gewicht.

Betrachtet man die Werte der Tabelle 7 im Einzelnen, so fällt auf, dass Fahrzeuge, die am Autobahndreieck 6 abfahren möchten, länger unterwegs sind als diejenigen, die bei B das Netz verlassen. Dies liegt daran, dass das Streckensegment zwischen 5 und 6 besonders hoch belastet ist und auch viele Fahrzeuge am AD 6 ausfahren möchten. Dies führt hier zu Rückstau und Verzögerungen, die sich auch auf dem rechten Fahrstreifen fortsetzen, während Fahrzeuge mit Ziel B auf den linken Fahrstreifen ausweichen und vorbeifahren können.

Tabelle 7: Durchschnittliche Reisezeiten [min] Basis-Szenario

PKW	1 ab	2 ab	3 ab	4 ab	5 ab	6 ab	B ab
A zu	1,27	3,64	4,89	7,12	9,44	17,77	17,33
1 zu		3,34	4,63	6,76	9,16	17,65	17,18
2 zu			2,58	4,87	7,18	16,01	15,25
3 zu				3,62	6,02	14,22	13,92
4 zu					3,94	12,23	11,85
5 zu						9,75	9,24
6 zu							1,27
LKW	1 ab	2 ab	3 ab	4 ab	5 ab	6 ab	B ab
A zu	1,31	3,99	5,52	8,66	10,53	19,68	19,01
1 zu		3,54	5,10	7,78	9,31	18,45	19,26
2 zu			2,71	5,55	7,66	16,46	16,29
3 zu				4,05	6,53	15,59	15,19
4 zu					4,58	13,31	12,44
5 zu						9,12	9,55
6 zu							1,36

4.4.2 Szenario 100 % QSV D

Die Auswertung der verschiedenen Szenarien zeigt, dass die Streuung insbesondere bei kurzen Strecken und kleinen Reisezeitgewinnen sehr groß ist. Daher sind die Ergebnisse sehr volatil und nur begrenzt aussagekräftig. Dieser Zustand tritt hauptsächlich bei Reisezeitgewinnen von weniger als 120 Sekunden auf. Je größer die Reisezeitgewinne werden, umso geringer wird die Varianz der Ergebnisse und umso belastbarer werden diese. Diese Effekte entsprechen auch den Erwartungen und spiegeln wider, was in der Realität beobachtet werden kann. Durch Bremsvorgänge, ungewöhnliche Geschwindigkeitsprofile oder -differenzen von Verkehrsteilnehmern oder einem „Kolonnen-Verhalten“ von Fahrzeugen können auf kürzeren Streckenabschnitten leicht Verzögerungen entstehen oder falls diese eben nicht auftreten, kürzere Reisezeiten auftreten. Auf längere Strecken gesehen mitteln sich diese Effekte in der Regel aus, während sie bei kürzeren Distanzen oder knappen Ergebnissen einen erheblichen Einfluss auf die Auswertung haben. Zudem entscheiden sich Verkehrsteilnehmer im Rahmen ihrer Verkehrsmittel- und Routenwahl auf kurzen Strecken gegebenenfalls auch dafür, nicht die Managed Lane zu nutzen, obwohl sie dazu berechtigt

wären, da sie in ihrer individuellen Bewertung die Vorteile durch etwa Reisezeitgewinne geringer bewerten als die negativen Effekte, die beispielsweise durch Fahrstreifenwechsel entstehen. Aus diesen Gründen werden in der Folge verstärkt Strecken mit größeren Reisezeitgewinnen ausgewertet. Werte mit weniger als 120 Sekunden Reisezeitgewinn werden von der Bewertung im Rahmen der Simulationen komplett ausgeschlossen und nur qualitativ erfasst. Eine beispielhafte Tabelle mit OD-Beziehungen für ein Szenario ist im folgenden Abschnitt beschrieben und in aufzeigt.

Abbildung 50 stellt die Beziehung zwischen erwartetem Zeitgewinn und tatsächlichem Zeitgewinn dar, bewertet für Fahrzeuge, die von 1 nach 6 durch das gesamte synthetische Netzwerk fahren und die Option haben, gegen eine Gebühr von 0,5 €/km auf die Managed Lane zu wechseln. Um dies zu erreichen, wurden ausgehend von einem anfänglichen Wert mikroskopische Simulationen für das Szenario durchgeführt. Ein erwarteter Reisezeitgewinn für verschiedene Verkehrsmittel wurde angenommen und anschließend in der Simulation berechnet. Die Ergebnisse wurden dann als erwartete Reisezeit für die nächste Simulation verwendet. Die x-Achse des Diagramms repräsentiert die erwarteten Reisezeiten, während die y-Achse die Ergebnisse aus der mikroskopischen Simulation zeigt. Über alle untersuchten Szenarien und Entfernungen hinweg ergibt sich eine gespiegelte „S“-förmige Kurve. In der Betrachtung der Ergebnisse handelt es sich hier um das Optimum der Vorhersage, wenn die erwarteten Reisezeiten bestmöglich mit den gemessenen Reisezeiten übereinstimmen. Dieses befindet sich dort, wo die Gerade das Diagramm schneidet. Es ist zu erwarten, dass die tatsächlich zu erwartenden Reisezeiten auch innerhalb dieses Bereichs liegen werden, sobald ein Gewöhnungseffekt bei den Reisenden nach der Implementierung auftritt. Der Bereich um das Optimum weist die steilste Neigung auf. Die Abhängigkeiten zwischen erwarteten und tatsächlichen Reisezeiten verlaufen sehr konträr. Dies bedeutet, dass ein geringer erwarteter Zeitgewinn zu einem hohen Anteil an Alleinfahrern führt und nur ein geringerer Anteil an Fahrgemeinschaften und HOT-Fahrzeuge auftritt. Als Ergebnis bleibt die Managed Lane relativ frei, während die regulären Fahrspuren stark überlastet oder sogar überlastet sind, was zu erheblichem Zeitgewinn für die privilegierten Fahrzeuge führt.

Umgekehrt führt ein hoher erwarteter Zeitgewinn zu einem hohen Anteil an HOV- und HOT-Fahrzeugen, was zu einer hohen Nutzung der Managed Lane führt und den erzielbaren Zeitgewinn erheblich reduziert. Dieser Effekt kann auch in der Realität beobachtet werden, wenn neue Managed Lanes implementiert werden und die Benutzer zunächst beurteilen, ob diese Mobilitätsform für sie Vorteile bietet. Im Laufe der Zeit tritt ein Gewöhnungseffekt mit Wissenszuwachs auf, und die Straßenverkehrsbehörde kann auch durch variable Mautsätze eingreifen. In diesem Fall wird ein Optimum erreicht, bei dem der erwartete Zeitgewinn dem tatsächlichen Zeitgewinn bei etwas mehr als 10 Minuten Reisezeitgewinn entspricht. Es ist wichtig anzumerken, dass für einzelne Quell-Ziel-Paare in Abbildung 50 unterschiedliche Kurven beobachtet werden können und ein einheitlicher Faktor nicht direkt auf alle Quell-Ziel-Paare zur Anpassung angewendet werden kann.

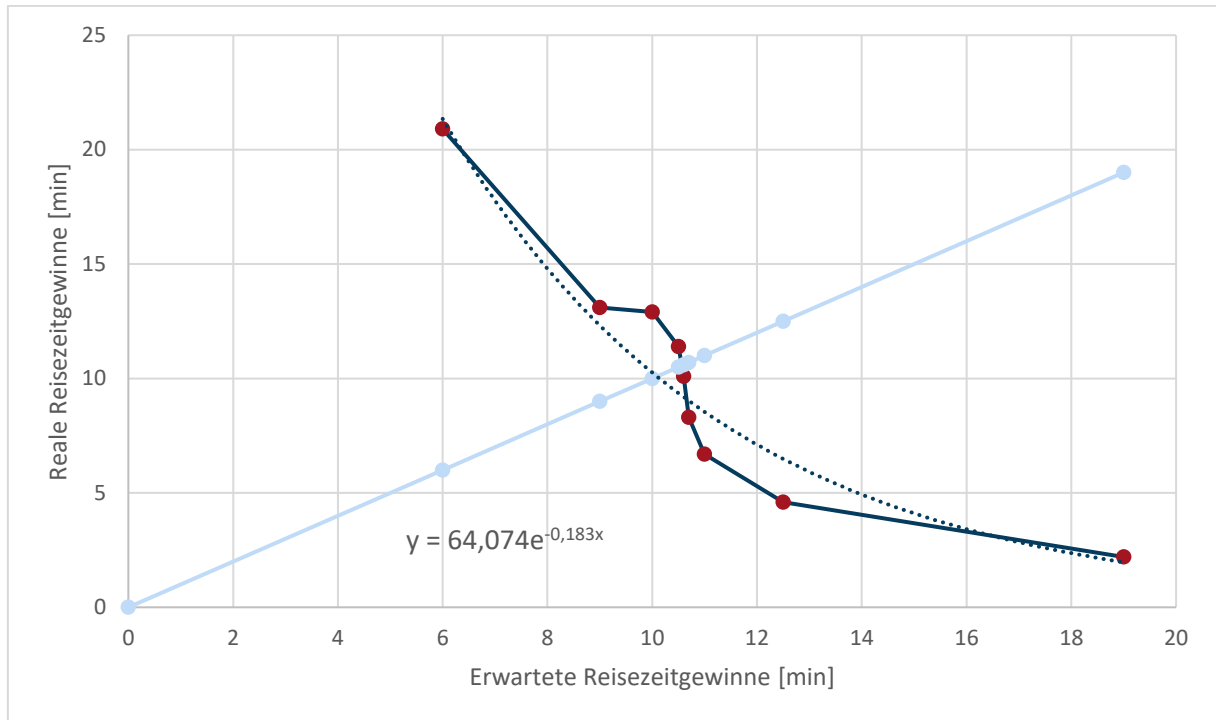


Abbildung 50: Verhältnis von erwarteten Reisezeitgewinnen zu realen Reisezeitgewinnen für 0,5 €/km; Blaue Linie: optimales Verhältnis Real-Erwartet, Schwarze Linie: gemessenes Verhältnis: Real-Erwartet, gepunktet: Ausgleichskurve

Tabelle 8 veranschaulicht exemplarisch den gewonnenen Reisezeitvorteil in Minuten für verschiedene Quell-Ziel-Paare in den verschiedenen Szenarien. Auf den ersten Blick wird deutlich, dass der Reisezeitvorteil besonders erheblich für längere Streckenabschnitte und hohe Verkehrsvolumina ist. Für kurze Entfernungen, wie sie bei nur einer Ausfahrt auftreten, kann der Reisezeitvorteil jedoch gelegentlich negativ ausfallen. Diese Verluste an Reisezeit betragen in der Regel nur wenige Sekunden und resultieren, wie zuvor erläutert, daraus, dass privilegierte Benutzer aufgrund des Einfädels in die Managed Lane gelegentlich gehemmt statt beschleunigt werden. In einer individuellen Gelegenheitsbewertung können einige Fahrer sich dazu entscheiden, auf den regulären Fahrspuren zu bleiben. Diese Situation kann zu Staus führen, die durch starken Verkehr oder eine beträchtliche Anwesenheit von Lastwagen verursacht werden. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass diese Werte stark schwankend sind und in einzelnen Simulationen gelegentlich positive Ergebnisse erzielen können. Abweichungen von 100 % oder mehr sind in diesem Analysebereich nicht ungewöhnlich.

Tabelle 8: Reisezeitgewinne [min] für 0,5 €/km

	1 ab	2 ab	3 ab	4 ab	5 ab	6 ab	B ab
A zu	0,06	0,58	0,96	1,45	2,72	9,77	10,33
1 zu		-0,66	0,56	1,12	2,08	9,57	10,02
2 zu			-0,63	0,59	1,39	8,99	9,17
3 zu				0,18	1,17	8,18	8,76
4 zu					0,60	7,80	8,29
5 zu						6,53	6,79
6 zu							-0,01

Mit zunehmender zurückgelegter Entfernung steigt auch der Reisezeitvorteil und tendiert dazu, sich zu stabilisieren. Die Abweichungen nehmen mit größerem Reisezeitvorteil substantiell ab, und bei einem Vorteil von 90 bis 120 Sekunden schwanken die Werte um 20 % bis 30 %. Sobald die Schwelle von 120 Sekunden Reisezeitvorteil überschritten ist, verringern sich die Abweichungen auf einstellige Prozentsätze. In der Farbcodierung der Tabelle, die auch für die weiteren Kapitel ihre Gültigkeit behält, werden somit negative Reisezeiten rot markiert, Reisezeitgewinne bis zu 2 Minuten aufgrund der hohen Schwankungen gelb hinterlegt und Reisezeitgewinne über 2 Minuten grün markiert. Die Analyse von Tabelle 8 verdeutlicht den erheblichen Einfluss des Verkehrsvolumens. Im Abschnitt zwischen Ausfahrt 4 und dem Autobahndreieck 6 ist die Verkehrsbelastung am höchsten, und die Autobahn ist teilweise überlastet. Hier kann ein Reisezeitvorteil von bis zu 7 Minuten über einen etwa 5 km langen Abschnitt realisiert werden. Ein Vergleich der Werte macht deutlich, dass das Einfädeln in oder das Verlassen der Managed Lane zu Reisezeitverlusten von ungefähr einer Minute führen kann.

Verkehrsverlagerung und Modal Split

Abbildung 51 zeigt, wie sich der Modal Split in verschiedenen Szenarien am Systemoptimum entwickeln. Es wird deutlich, dass der Anteil der HOT-Fahrzeuge mit steigenden Reisekosten beträchtlich abnimmt, während der Anteil der HOV-Fahrzeuge zunimmt. Die geringeren Anteile an HOT-Fahrzeugen gehen zugunsten des ÖPNV sowie der Fahrgemeinschaften, der Anteil an Alleinfahrern bleibt über alle betrachteten Szenarien konstant. Dass die Verkehrsverlagerungen in den unterschiedlichen Szenarien sich hauptsächlich bei den nicht SOV-Nutzern abspielen, spricht für stärkere Beharrungskräfte in dieser Nutzergruppe.

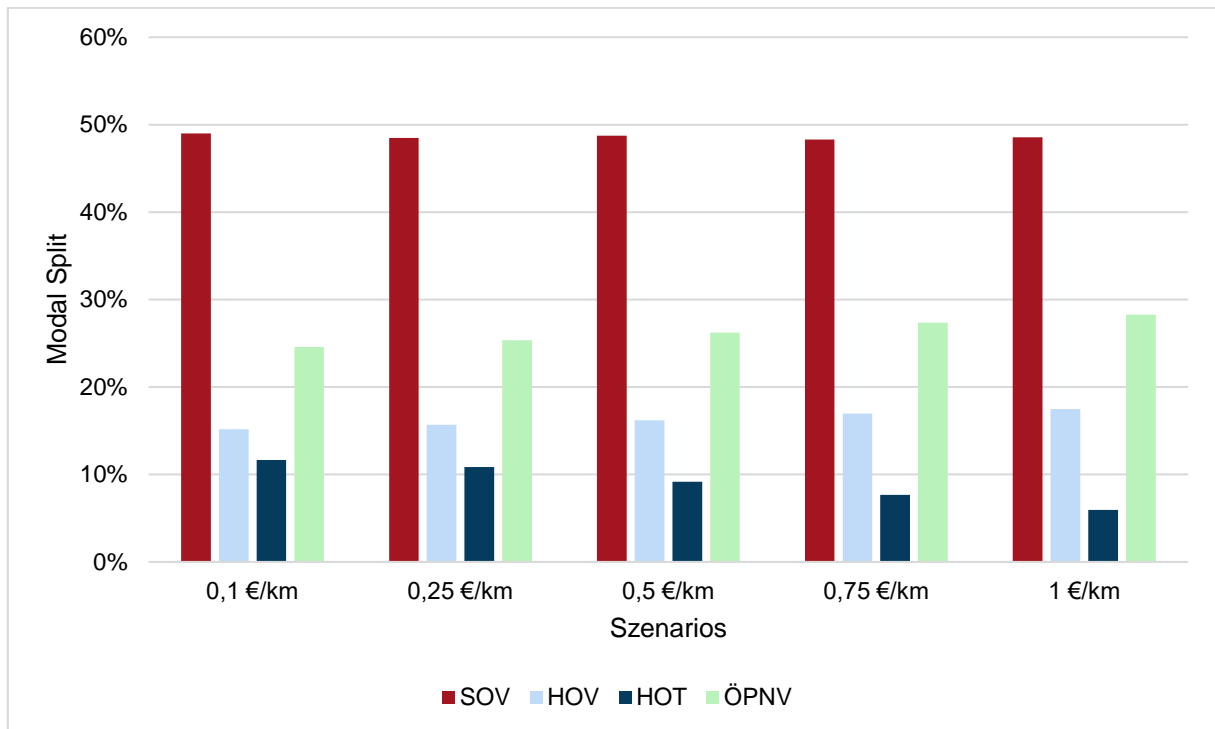


Abbildung 51: Modal Split für Fahrten von Autobahndreieck 1 nach Autobahndreieck 6

In Abbildung 51 wurde bereits der Modal Split für die verschiedenen Szenarien dargestellt. Da die Verschiebung des Modal Splits zugunsten des öffentlichen Verkehrs und von Fahrgemeinschaften ein zentrales politisches Ziel ist und den Ausgangspunkt vieler Managed Lanes darstellt, wird dieses Thema nochmals vertieft dargestellt. Im Folgenden werden die Potenziale für eine Verlagerung auf andere Verkehrsmittel in den verschiedenen Systemen aufgezeigt.

Abbildung 52 veranschaulicht den durchschnittlichen Modal Split über das gesamte System hinweg und in verschiedenen Szenarien, einschließlich Pendler, die statt der Autobahn den öffentlichen Verkehr für ihren Arbeitsweg nutzen. Mit steigenden Straßennutzungsgebühren zeigt sich ein leichter Trend zugunsten des öffentlichen Verkehrs und der HOV (Fahrgemeinschaften) zu Lasten von HOT (bezahlende Alleinfahrer). Dieser Trend bewegt sich jedoch innerhalb weniger Prozentpunkte, wobei der Anteil der HOT-Fahrzeuge halbiert wird. Wie erwartet nimmt der Anteil der Pendler, die für eine HOT-Spur bezahlen würden, mit höheren Kosten ab. Dennoch wird deutlich, dass der Gesamteinfluss der Reisekosten eher begrenzt ist. Der Anteil der Fahrzeuge mit Alleinfahrern (SOV) bleibt nahezu konstant über die verschiedenen Szenarien hinweg. Dies bestätigt die Ergebnisse aus (Schönhofer et al. 2023a) und Kapitel 3.1.1, dass es einen erheblichen Anteil von Pendlern gibt, die auch bei gewissen Nachteilen die Alleinfahrt im PKW bevorzugen und nicht bereit sind, auf HOV, HOT oder den ÖPNV umzusteigen. Die geringen Variationen im Gesamtsystem sind jedoch hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass viele Fahrzeuge nur kurze Strecken auf der Autobahn zurücklegen, was unzureichende Anreize schafft, von Alleinfahrten auf andere Verkehrsmittel umzusteigen. Die Anzahl der LKW im System wird nicht detailliert dargestellt, da sie in allen

Szenarien konstant bleibt und der leichte Anstieg ihres Anteils am Gesamtverkehr auf die verringerte Anzahl von Fahrzeugen durch Fahrgemeinschaften und den Wechsel zum öffentlichen Verkehr zurückzuführen ist, was zu einer Verringerung der Fahrzeuganzahl im Gesamtsystem führt.

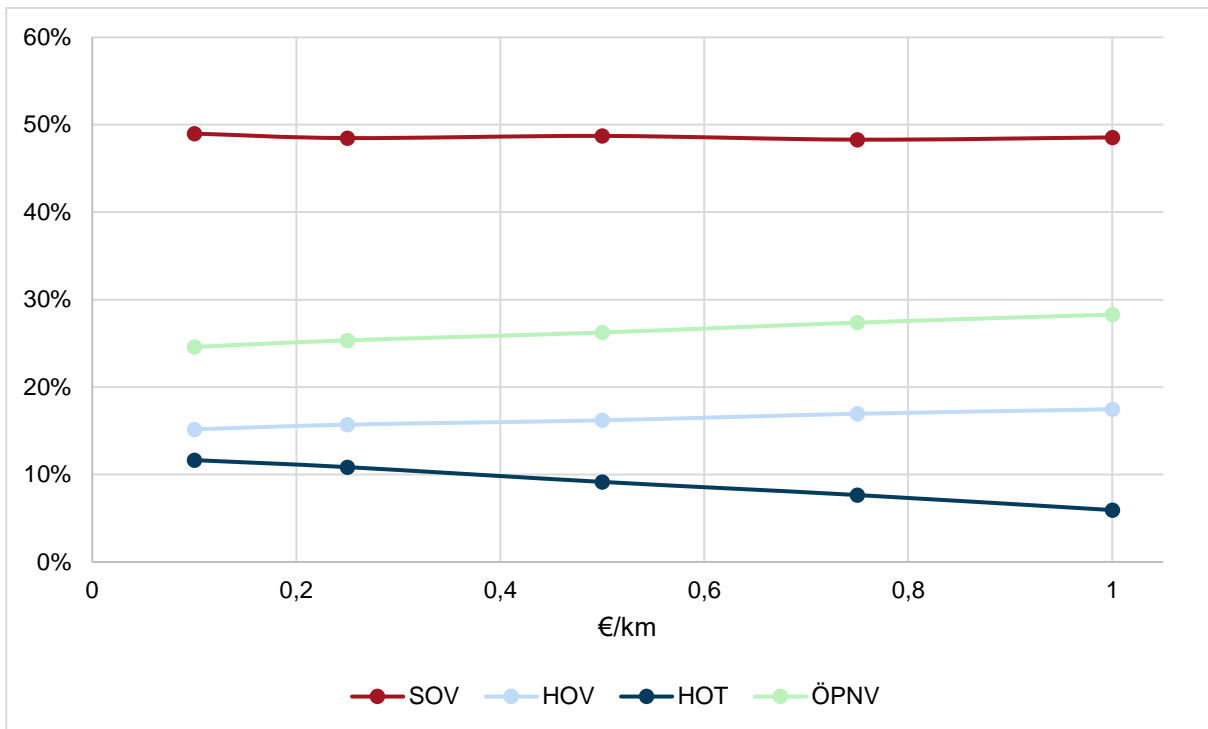


Abbildung 52: Modal Split für das Gesamtnetz (gewichtet nach der gefahrenen Streckenlänge)

In Abbildung 53 wird erneut der durchschnittliche Modal Split über das gesamte System und die verschiedenen Szenarien dargestellt, dieses Mal jedoch auf den Individualverkehr hin angepasst, also ohne die Verkehrsträger Schwerverkehr und ÖPNV. Mit steigenden Straßennutzungsgebühren wird ein leichter Trend zugunsten von Alleinfahrern (SOV) und Fahrgemeinschaften (HOV) zu Lasten von bezahlenden Alleinfahrern (HOT) deutlich. Dieser Trend bewegt sich jedoch innerhalb weniger Prozentpunkte. Wie erwartet nimmt der Anteil der Pendler, die für eine HOT-Spur bezahlen würden, mit höheren Kosten ab. Dennoch wird deutlich, dass der Gesamteinfluss der Reisekosten eher begrenzt ist. Insgesamt zeigt die Analyse des gesamten Systems klar, dass im optimalen Nutzungsfall der Verkehr gleichmäßig über den Querschnitt verteilt ist.

Zur Erinnerung: In dieser Simulation wird ein 6-streifiger Querschnitt mit drei Spuren in jede Fahrtrichtung, mit einem kostenpflichtigen Fahrstreifen auf dem linken Fahrstreifen untersucht. Folglich stehen zwei Drittel der Fahrstreifen für den allgemeinen Verkehr zur Verfügung, was

in etwa der Verteilung der Fahrzeugtypen entspricht, wobei etwa zwei Drittel Einzelfahrzeuge (SOV) sind und insgesamt ein Drittel HOT- und HOV-Fahrzeuge ausmachen.

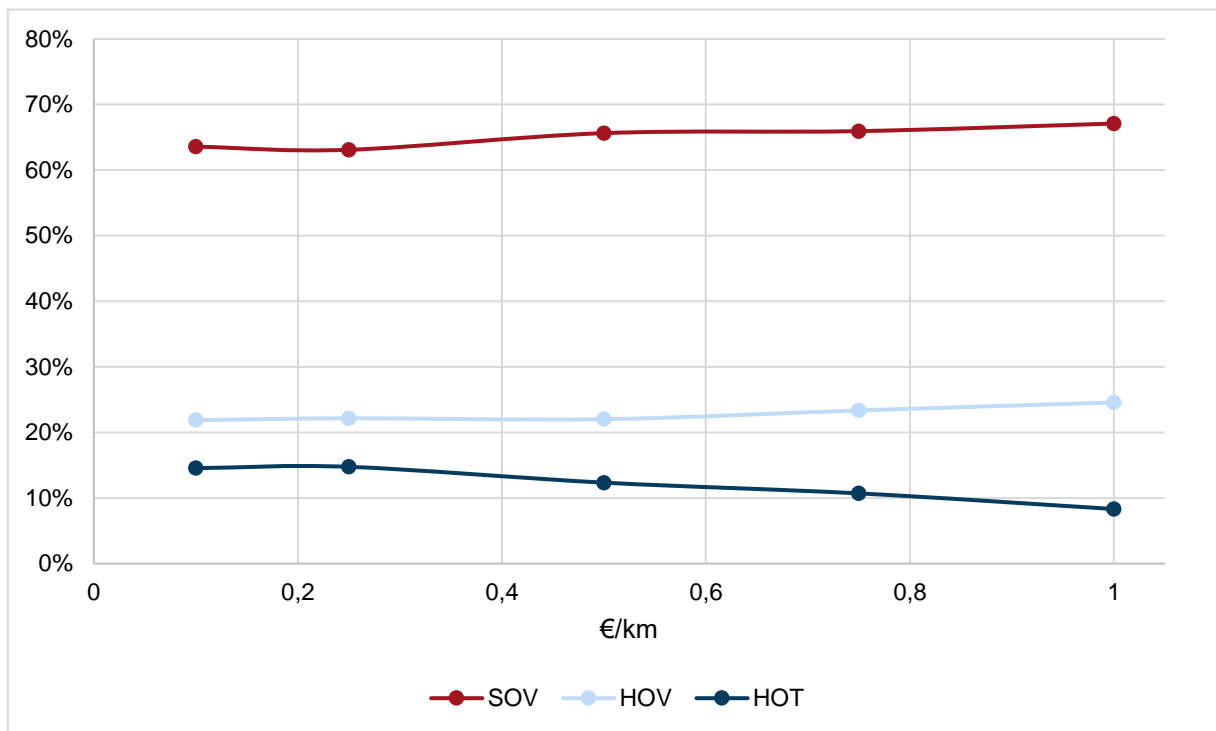


Abbildung 53: Modal Split für das Gesamtnetz für Individualverkehr (ohne ÖPNV)

Bei Vergleich der vorliegenden Ergebnisse wird deutlich: Auf einem kurzen Straßenabschnitt hat das Preisniveau keinen substantziellen Einfluss auf die Wahl des Verkehrsmittels durch die Pendler. Der Anteil der LKW in diesem Beispiel beruht auf den Zufallszahlen, die in den Szenarien verwendet werden, und dient als Grundlast für das Netzwerk; er würde sich auf einem anderen Straßenabschnitt ändern, im Gegensatz zu den konstanten Anteilen der anderen Verkehrsmittel. Insgesamt sind die Werte für Einzelfahrzeuge (SOV) für kurze Abschnitte wesentlich höher als die des gesamten Netzwerks, und es gibt leichte Zunahmen für den ÖPNV, während die anderen Verkehrsmittel geringere Variationen aufweisen.

Reisezeit und Reisezeitgewinne

Der Ausgangspunkt für die Untersuchung des Reisezeitgewinns sind zunächst die Reisezeiten im sogenannten „Basis-Szenario“. In diesem Szenario gibt es keine Managed Lane (in den Szenarien dann als HOT-Lane ausgebildet) und daher keine HOT-Fahrzeuge, die sich Privilegien im Verkehrsfluss erkaufen können. Folglich werden in diesem Fall nur die Gruppen SOV, HOV und Lastwagen bewertet, wobei HOV- und SOV-Fahrzeuge keine substantziellen Unterschiede in ihren Reisegeschwindigkeiten aufweisen. In den folgenden Bewertungen beziehen sich die Reisezeiten auf die SOV des „Basis-Szenarios“.

Abbildung 54 vergleicht die durchschnittlichen Reisezeiten für das gesamte System zwischen dem Basis-Szenario und den verschiedenen Szenarien. Die rote Linie repräsentiert die

durchschnittlichen Reisezeiten aller Fahrzeuge im Netzwerk in Minuten für den Fall ohne kostenpflichtigen Fahrstreifen. SOV und HOV erzielen die gleichen Reisezeiten. Zur Klarstellung wird die Reisezeit von SOVs auch als Referenzwert für HOTS angegeben. Beim Vergleich der verschiedenen Szenarien wird deutlich, dass die Implementierung eines kostenpflichtigen Fahrstreifens zu einer durchschnittlichen Erhöhung der Reisezeit von wenigen Sekunden bis zu zwei Minuten für SOV im Vergleich zum Basis-Szenario führt. Im Gegensatz dazu verbessert sich die Situation für HOV- und HOT-Fahrzeuge, mit durchschnittlichem Reisezeitgewinn von bis zu drei Minuten. HOT-Fahrzeuge sind sogar etwas schneller als HOV-Fahrzeuge, was auf die persönlichen Vorlieben der HOT-Fahrer zurückzuführen ist. Für den Schwerverkehr verschlechtern sich die Reisezeiten im Vergleich zur ursprünglichen Querschnittsgestaltung aufgrund stärkerer Überlastung auf den regulären Fahrspuren.

Hinsichtlich der Szenarien im Allgemeinen ist es interessant festzustellen, dass im Szenario mit den höchsten Kosten die günstigsten Reisezeiten für alle Fahrzeugtypen auftreten. Dies liegt teilweise daran, dass in diesem Szenario die größte Verlagerung hin zum öffentlichen Verkehr erfolgt, was zu einer Reduzierung der Gesamtzahl der Autos im Netzwerk führt.

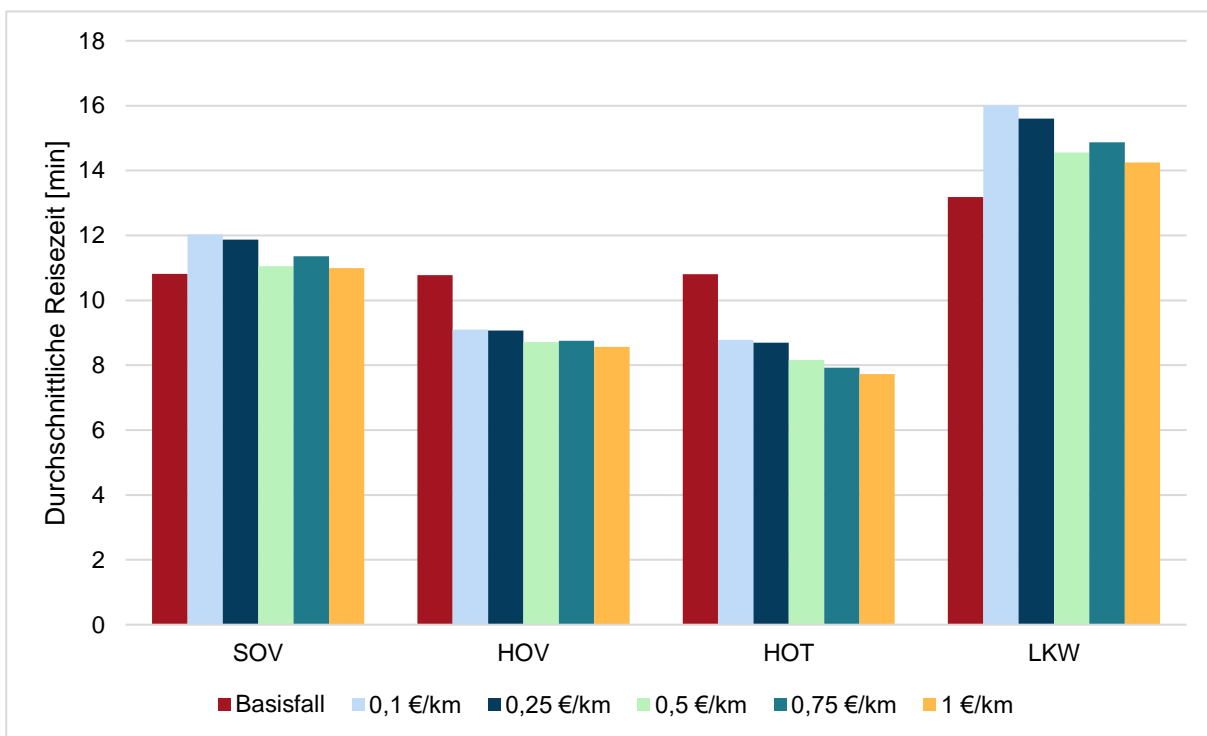


Abbildung 54: Gesamtnetz - Reisezeiten bei unterschiedlichen Kostensätzen

Während in Abbildung 54 das Gesamtnetz dargestellt ist und damit viele Fahrzeuge einschließt, die nur einen kurzen Abschnitt auf der Autobahn zurücklegen und somit die Reisezeitverluste ausgleichen, zeigt Abbildung 55 die Entwicklung der Reisezeiten in den verschiedenen Szenarien für Fahrzeuge, die von Autobahndreieck 1 nach Autobahndreieck 6 fahren. Dieser Abschnitt wurde gewählt, um die Auswirkungen einer längeren Fahrt auf der

Bezahlspur zu bewerten, die nicht durch Ein- und Ausfahrtvorgänge gestört wird. Hier sind deutlich größere Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrzeuggruppen erkennbar, mit insgesamt längeren Reisezeiten. Erneut repräsentiert die rote Linie den Basis-Fall, der als Referenz ohne kostenpflichtigen Fahrstreifen dient. Die fünf Balken beschreiben die verschiedenen Szenarien. In diesen Szenarien treten Reisezeitverluste von bis zu 5 Minuten im Vergleich zum Referenzszenario für Alleinfahrer auf, während HOT- und HOV-Fahrzeuge deutlich schneller sind als im Referenzszenario. Wie im gesamten System beobachtet, erleben auch Lastwagen längere Reisezeiten, wenn ein kostenpflichtiger Fahrstreifen existiert.

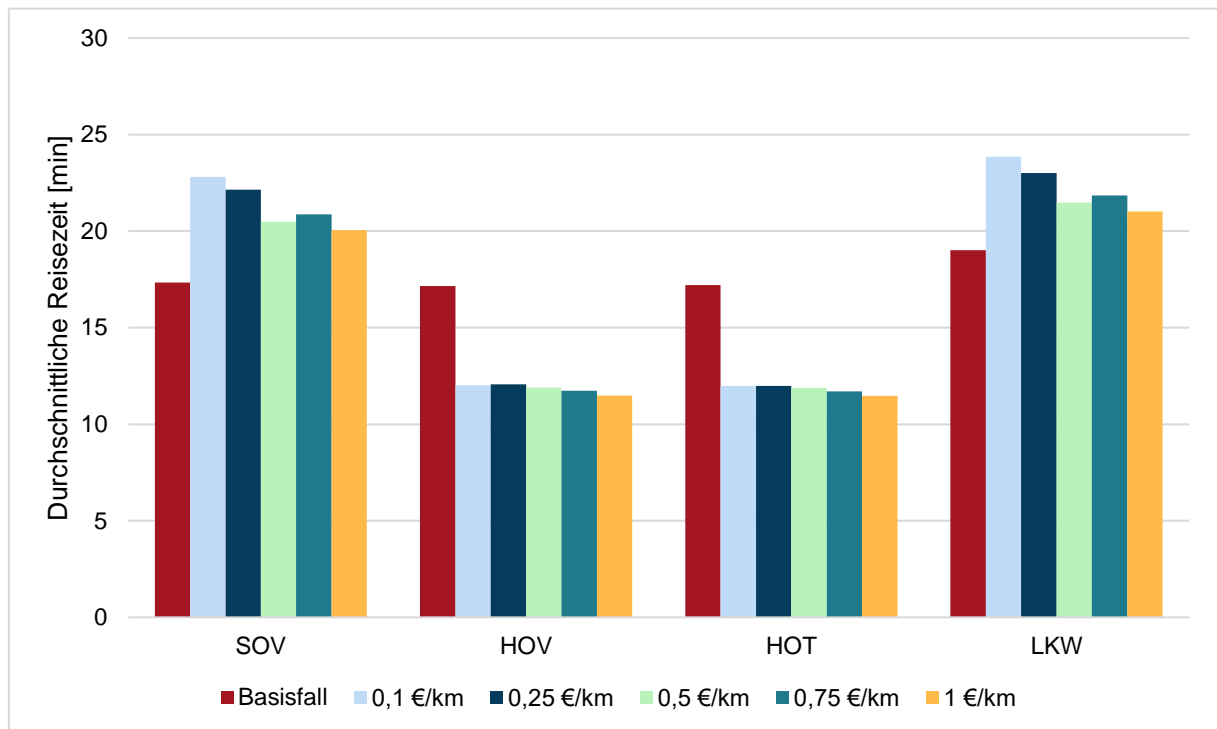


Abbildung 55: Autobahndreieck 1 bis Autobahndreieck 6 - Reisezeiten bei unterschiedlichen Kostensätzen

Die Kombination von Abbildung 52 und Abbildung 54 zeigt, dass bei Betrachtung aller Pendler etwa die Hälfte der Reisenden Reisezeitverluste im Vergleich zu einer Autobahn ohne Bezahlspur erlebt. Wenn ausschließlich Pendler betrachtet werden, die die Autobahn nutzen, ist das Verhältnis von Profiteuren zu denjenigen, die Verluste erleben, noch deutlicher, nämlich $\frac{1}{3}$ zu $\frac{2}{3}$. Die Untersuchung des Abschnitts zwischen den beiden Knotenpunkten 1 und 6 ergibt eine sehr ähnliche Verteilung von Gewinnern und Verlierern durch einen kostenpflichtigen Sonderfahrstreifen. Im Allgemeinen verschlechtert sich die Situation für Pendler, die nur eine kurze Strecke auf der Autobahn zurücklegen, da sie weniger wahrscheinlich einer Fahrgemeinschaft beitreten oder für die Nutzung der HOT-Lane bezahlen, da sie aufgrund der kürzeren Strecke mit vergleichsweise geringeren potenziellen Reisezeitgewinnen zu rechnen haben. Zum Beispiel profitiert nur jeder fünfte Pendler von der HOT-Lane auf einer Fahrt zwischen den Anschlussstellen 2 und 3. Weiterhin sind die optimalen Reisezeitersparnisse pro Szenario bei höheren Kosten geringer. Die

Schwankungen sind jedoch in diesem Fall spürbar weniger ausgeprägt. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass insgesamt weniger Personen auf HOV/HOT umsteigen, was zu reduzierten Möglichkeiten führt, sich im Straßennetz zu verflechten und auf die gewünschten Fahrspuren zuzugreifen, da die Fahrspur für allgemeinen Verkehr (GPL) stärker genutzt wird.

In Abbildung 56 wird der Prozentsatz der Verkehrsteilnehmer dargestellt, die Reisezeitgewinne und -verluste erleben. Hinsichtlich der Achsen bedeuten negative Werte, dass Fahrzeuge schneller sind als im Basisszenario, während positive Werte längere Reisezeiten ausdrücken. In dieser Analyse liegt der Fokus auf Fahrzeugen, die entweder bei A oder 1 einfahren und dann die gesamte Strecke bis 6 oder B zurücklegen. Teilnehmer, die früher ausfahren oder später einfahren, werden zunächst nicht berücksichtigt. Ebenso sind alle Teilnehmer, die öffentliche Verkehrsmittel nutzen, ausgeschlossen, da es keine klare Korrelation zwischen den Szenarien und schnelleren oder langsameren Reisezeiten gibt. Bei genauer Betrachtung des Graphen erleben im Szenario mit Kosten von 0,1 €/km fast 85 % der Einzelfahrzeuge (SOV) längere Reisezeiten im Vergleich zum Basisszenario, während etwa 15 % schneller sind. Dieses Verhältnis verschiebt sich zugunsten derjenigen, die schneller sind als im Basisszenario, wenn die Kosten pro km steigen und erreicht 68 % für 1 €/km. Ein ähnliches Muster ist bei den Lastwagen (LKW) zu beobachten, mit leicht unterschiedlichen Prozentanteilen. Über 80 % von ihnen erleben längere Reisezeiten ohne kostenpflichtigen Sonderfahrstreifen und dieser Prozentsatz nimmt mit höheren Kosten ab. Im Gegensatz dazu zeigen HOT- und HOV-Fahrzeuge ein unterschiedliches Verhalten. Mit Ausnahme weniger Fahrzeuge sind diese Gruppen immer schneller, wenn sie die HOT-Lane nutzen, und erreichen konstant Werte von 99 %-100 % für den Anteil der schnelleren Fahrzeuge. Betrachtet man den Gesamtanteil an PKW, also SOV-, HOV- und HOT-Fahrzeuge, die schneller sind als im Basis-Szenario, so liegt der Wert stets zwischen 55 % und 61 %. Das bedeutet, dass trotz Einschränkungen in der Verfügbarkeit der regulären Fahrstreifen, mehr als die Hälfte der PKW-Nutzer schneller ist als im Basis-Szenario.

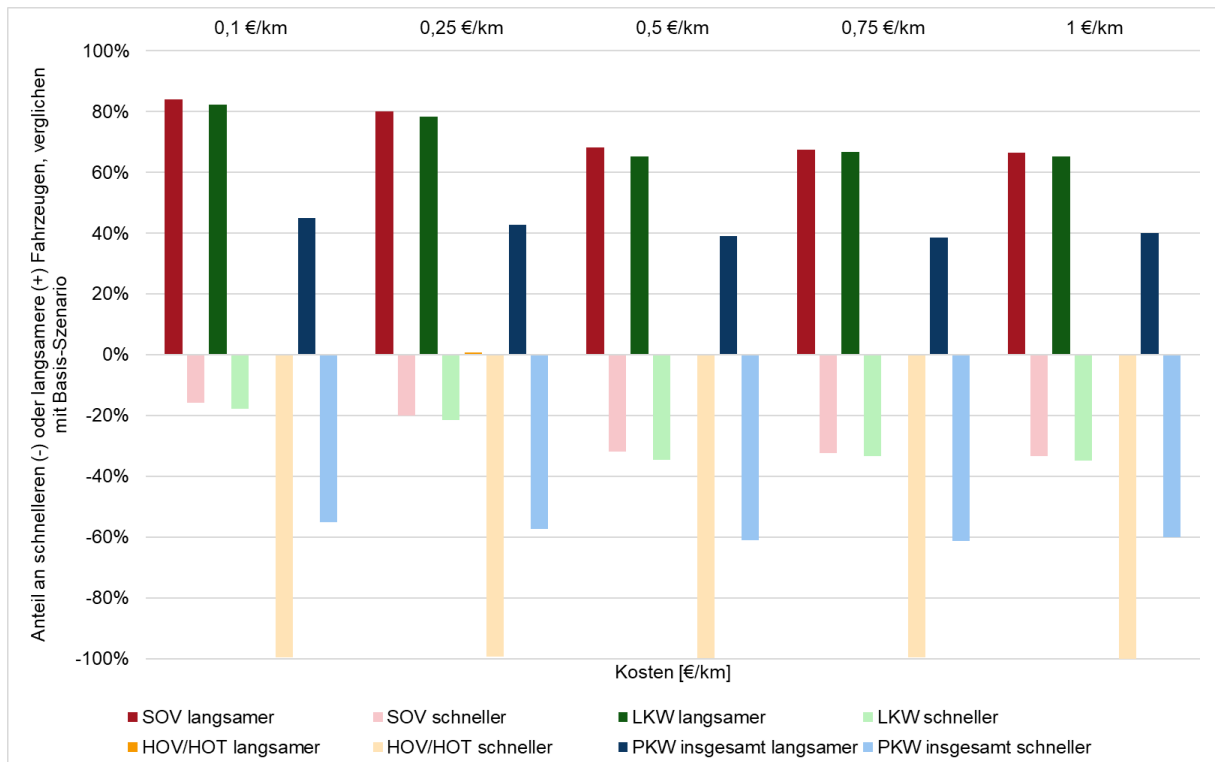


Abbildung 56: Anteil an schnelleren (-) oder langsameren (+) Fahrzeugen verglichen mit Basis-Szenario

Abbildung 57 zeigt die durchschnittlichen Reisezeiten im analysierten Abschnitt, basierend auf Abbildung 54. Um die Lesbarkeit zu erleichtern, werden HOT- und HOV-Fahrzeuge in den Graphen kombiniert, da sie nahezu identische Verläufe aufweisen. Die Werte bei 0 €/km spiegeln die des Basisszenarios wider, in dem keine HOT-Lane existiert. Dies verdeutlicht weiterhin die Verschiebung der Reisezeiten. Die Auswertung zeigt eine allgemeine Tendenz abnehmender durchschnittlicher Reisezeiten, wobei eine vorübergehende Zunahme im Bereich zwischen 0,6 €/km und 0,8 €/km auftritt. Dies zeigt sich auch in der durchschnittlichen Geschwindigkeit und allen anderen Analysen. Insgesamt sind, wie zuvor erwähnt, die Reisezeiten für Alleinfahrer (SOVs) und Lastwagen höher als die des Basisszenarios, während die Reisezeiten für HOV- und HOT-Fahrzeuge niedriger sind. Diese Analyse wird in der Bewertung der Emissionen in einem der folgenden Kapitel noch von größerer Bedeutung sein.

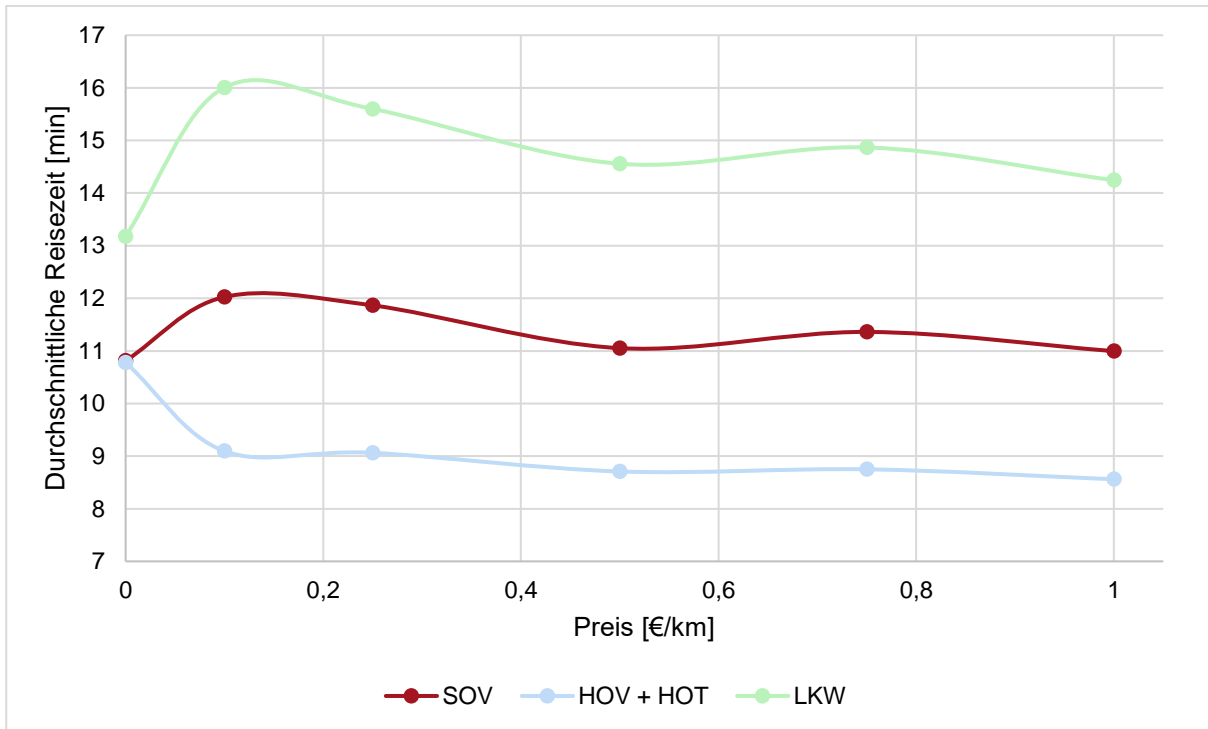


Abbildung 57: Durchschnittliche Reisezeiten bei unterschiedlichen Kostensätzen

4.4.3 Szenario 120 % QSV D

Die Erhöhung der Verkehrsmenge im Szenario auf 120 % der des Ausgangsszenarios mit 100 % QSV D führt zu deutlich höheren Reisezeiten und Verzögerungen im Netz. Benötigt ein PKW im Ausgangsfall gut 12 Minuten, um das Simulationsnetz komplett zu durchfahren, sind es im hochbelasteten Szenario mehr als 31 Minuten. Analog dazu steigt die Reisezeit von LKW von etwa 14,5 Minuten auf knapp 33 Minuten an. In beiden Fällen sind die Fahrzeuge somit mehr als 2,5-mal so lange unterwegs. Damit steigen die Potenziale für Reisezeitgewinne deutlich an, wenn man davon ausgeht, dass die Managed Lane so gesteuert werden kann, dass dort weiterhin ein freier und ungestörter Verkehrsfluss möglich ist. Dies hat auch deutliche Auswirkungen auf den Modal Split. Wird angenommen, dass die Reisezeit für den ÖPNV der des vorherigen Szenarios entspricht, bietet sich hier ein Anreiz von bis zu 19 Minuten Reisezeitgewinn. Da im Ausgangsszenario noch keine Managed Lane implementiert ist, ist der Anreiz auf eine Fahrgemeinschaft zu wechseln von den Reisezeitgewinnen nicht betroffen. Vergleicht man den Modal Split, der in Abbildung 58 dargestellt ist, mit dem des Ausgangsszenarios aus Abbildung 49, zeigt sich, dass rund 14 % mehr Pendler auf den ÖPNV wechseln, wenn die Reisezeiten entsprechend größer sind. Diese gehen hauptsächlich zu Lasten der Alleinreisenden, wobei sich auch einige Fahrgemeinschaften entscheiden zu wechseln. Insgesamt fahren mit 58 % immer noch die meisten der Pendler allein mit dem PKW zur Arbeit. Knapp jeder Zehnte geht eine Fahrgemeinschaft ein. Großer Profiteur ist jedoch der ÖPNV mit 34 %, der seinen Wert von 20 % im Ausgangsszenario damit beinahe verdoppeln kann. Hier zeigt sich deutlich, welch großen Anreiz Reisezeitgewinne bei Pendlern darstellen.

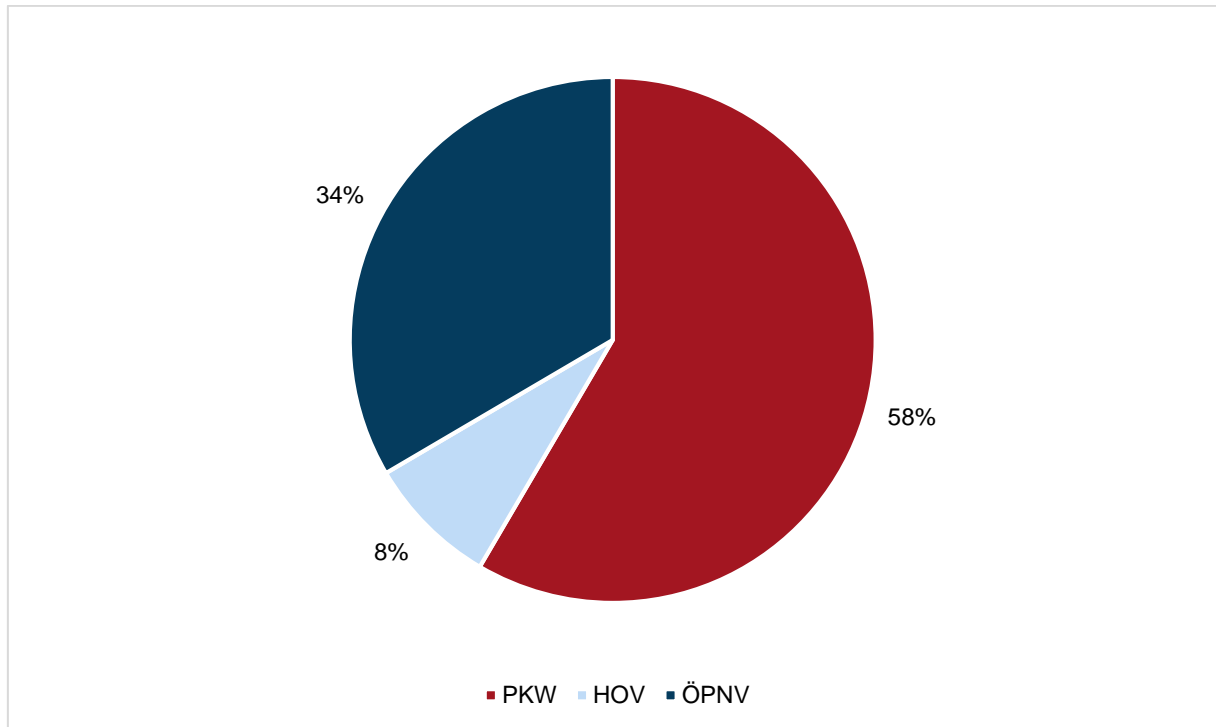


Abbildung 58: Modal Split bei 120 % QSV D

Analog zur Auswertung im Basis-Szenario in Tabelle 8 wird auch in diesem Kapitel, hier in Tabelle 9, die optimalen Reisezeitgewinne für ein beispielhaftes Szenario betrachtet. Wie zuvor wird auch hier für jedes Szenario ein Optimum ermittelt, bei dem die erwarteten Reisezeitgewinne den realen Reisezeitgewinnen entsprechen. Ein Zustand, der sich erfahrungsgemäß nach der einige Wochen dauernden Etablierungsphase einstellt, wenn die Pendler wissen, welche Auswirkungen ihre Verkehrsmittelwahl hat und die Algorithmen der Verkehrssteuerung genügend Daten für eine effiziente Steuerung gesammelt haben. Der Verlauf der Kurve entspricht erneut einer „gespiegelten S-Form“ wie in Abbildung 50 und wird daher hier nicht erneut dargestellt. Gleichwohl ist zu beachten, dass der Graph dieser Auswertung für jedes Szenario individuell ist und daher eine eigene Formel hat, die nicht übertragen werden kann. Der Optimalzustand tritt ein, wenn sich ein Gleichgewicht zwischen den Pendlern einstellt, die bereit sind für gewissen Vorteile eine Fahrgemeinschaft einzugehen oder zu bezahlen und denen, die weiterhin die regulären Fahrstreifen nutzen möchten. Dieser Optimalwert der Nutzer der HOT-Lane liegt nicht im Bereich der größten erreichbaren Reisezeitgewinne, da in diesem Fall zu viele Pendler die Vorteile der Managed Lane nutzen möchten und diese damit überlastet wird. Da die allgemeinen Reisezeiten durch die gestiegene Verkehrsbelastung im vorliegenden Szenario größer sind, steigen auch die optimalen Reisezeitgewinne für längere Strecken. So liegt der maximal erreichbare Reisezeitgewinn in Tabelle 8 bei 10,3 Minuten, für Fahrzeuge, die das komplette Simulationsnetz durchqueren. Im vorliegenden Szenario mit höherer Verkehrsdichte liegt der Vergleichswert bereits bei rund 13,5 Minuten. Anders sieht es bei kurzen Streckenabschnitten aus. Durch die erheblichen Reisezeitverluste bei Einfahrt und Ausfahrt sowie bei der Verflechtung auf und von der Managed Lane, sind die erreichbaren Reisezeitgewinne

gegenüber dem Basisfall hier geringer. Wie bereits im Basisszenario steigen auch hier die erzielbaren Reisezeitgewinne bis zum Autobahndreieck 6 stetig an. Es zeigt sich ebenfalls, dass die Reisezeitgewinne auf kürzeren Strecken volatil sind und sich je mehr stabilisieren, umso länger die zurückgelegten Strecken werden. Die Gründe hierfür sind die Gleichen wie im Basisszenario.

Tabelle 9: Reisezeitgewinne [min] für 0,5 €/km bei Szenario 120 % QSV D

	1 ab	2 ab	3 ab	4 ab	5 ab	6 ab	B ab
A zu	0,05	0,66	1,21	3,12	6,71	12,87	13,45
1 zu		0,17	0,60	2,02	5,87	12,40	12,79
2 zu			0,10	1,02	6,35	11,78	10,33
3 zu				0,72	4,29	10,47	10,26
4 zu					-1,03	6,18	7,65
5 zu						1,21	1,23
6 zu							-0,01

Verkehrsverlagerung und Modal Split

In Abbildung 59 ist die Entwicklung des Modal Split für das Gesamtnetz dargestellt. Wie bereits im Basisszenario zeigt sich auch hier der Anteil der Alleinfahrer (SOV) über alle Kostensätze konstant. Alle Änderungen spielen sich somit innerhalb der Gruppe der Nutzer der Managed Lane sowie des ÖPNVs ab. Mit steigenden Mautgebühren nimmt erwartungsgemäß die Bereitschaft für die Nutzung der Managed Lane Geld zu bezahlen ab, so dass sich der Anteil der HOT-Nutzer etwa halbiert. Diese Verluste kommen zu etwa gleichen Teilen den Fahrgemeinschaften und dem ÖPNV zugute. Vergleichen mit dem Basisszenario, liegen die Werte für SOV nun rund 5 Prozentpunkte niedriger, wovon allen anderen Verkehrsträger, aber insbesondere der ÖPNV profitiert. Vergleichen mit dem Nullfall, bei dem noch keine Managed Lane implementiert ist, ergeben sich deutliche Verschiebungen beim Modal Split. Sind, wie in Abbildung 58 dargestellt, 58 % der Pendler als Alleinfahrer unterwegs, sinkt dieser Anteil durch die Managed Lane auf rund 45 %. Diese Pendler wechseln sowohl als bezahlende Alleinfahrer (HOT) auf die Managed Lane, als auch in Fahrgemeinschaften. Allerdings kann auch beobachtet werden, dass die Anzahl an ÖPNV-Fahrern um 5–10 % abnimmt, wobei gilt, je geringer die Streckennutzungsgebühren, umso geringer der Anteil an ÖPNV-Nutzern. Demgegenüber bietet die Managed Lane augenscheinlich einen größeren Anreiz, um Fahrgemeinschaften einzugehen, da sich deren Anteil im Vergleich zum Nullfall mindestens verdoppelt.

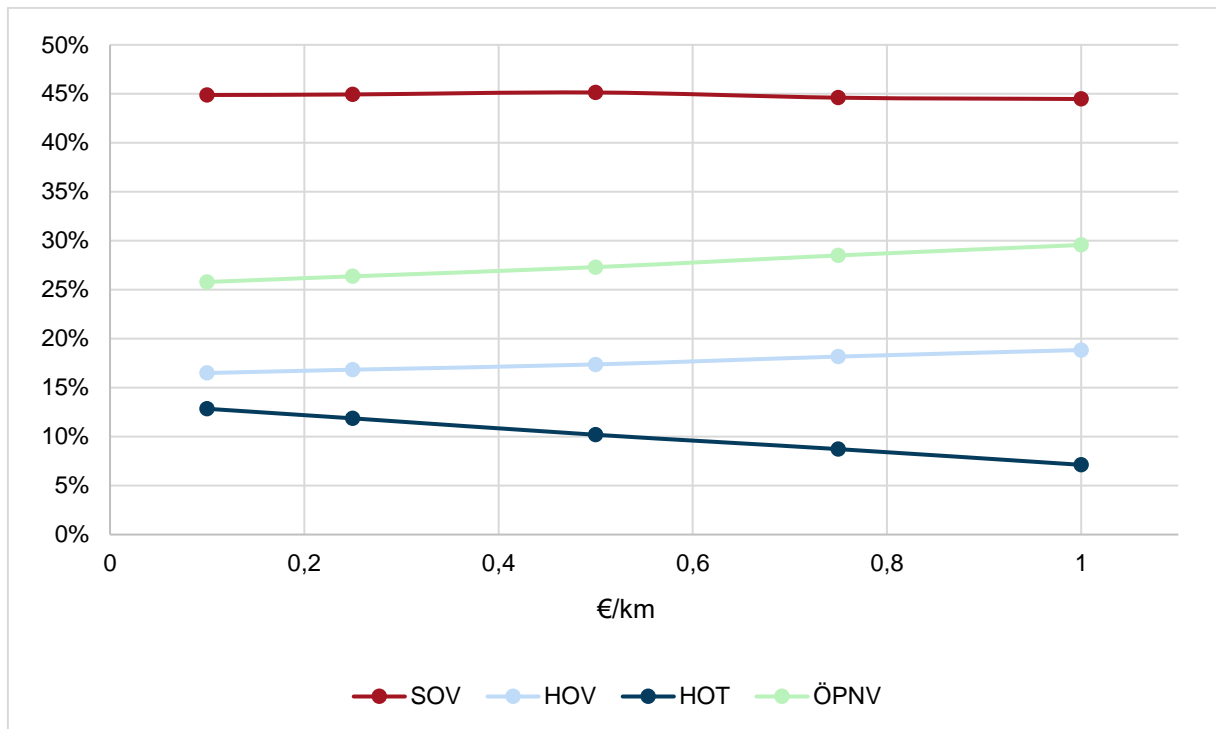


Abbildung 59: Modal Split Szenario 120 % Gesamtnetz

Da in Abbildung 59 das gesamte Simulationsnetz betrachtet wird, verschwimmen einige Effekte, die sich beispielsweise auf kurzen oder langen Strecken beobachten lassen. Damit ergeben sich nur geringe Abweichungen in den Auswertungen. In Abbildung 60 ist daher der Modal Split für die Fahrzeuge aufgeführt, die bei Autobahndreieck 1 auffahren und bei Autobahndreieck 6 wieder abfahren. Es werden hier somit nur Fahrzeuge betrachtet, die eine längere Strecke auf der Autobahn fahren. Zunächst fällt auf, dass bei sehr hohen Straßennutzungsgebühren der ÖPNV den Alleinfahrer als beliebtestes Verkehrsmittel ablöst. Dies ist das Resultat von großen Reisezeitgewinnen im ÖPNV und hohen allgemeinen Reisezeiten durch einen sehr dichten Verkehr. Mit steigenden Kosten kommt es bei den HOT-Fahrzeugen erneut beinahe zu einer Halbierung des Anteils, während Fahrgemeinschaften und der ÖPNV deutlich profitieren können. Beide Verkehrsmittel gewinnen über die verschiedenen Kostensätze rund 5 % dazu. Vergleicht man Abbildung 59 und Abbildung 60, so erkennt man, dass der Anteil der Alleinfahrer im System um etwa 10 % abnimmt. Diese Pendler wechseln etwa zu gleichen Teilen zu den Fahrgemeinschaften und dem ÖPNV, die beide um rund 5 % stärker ausfallen als zuvor.

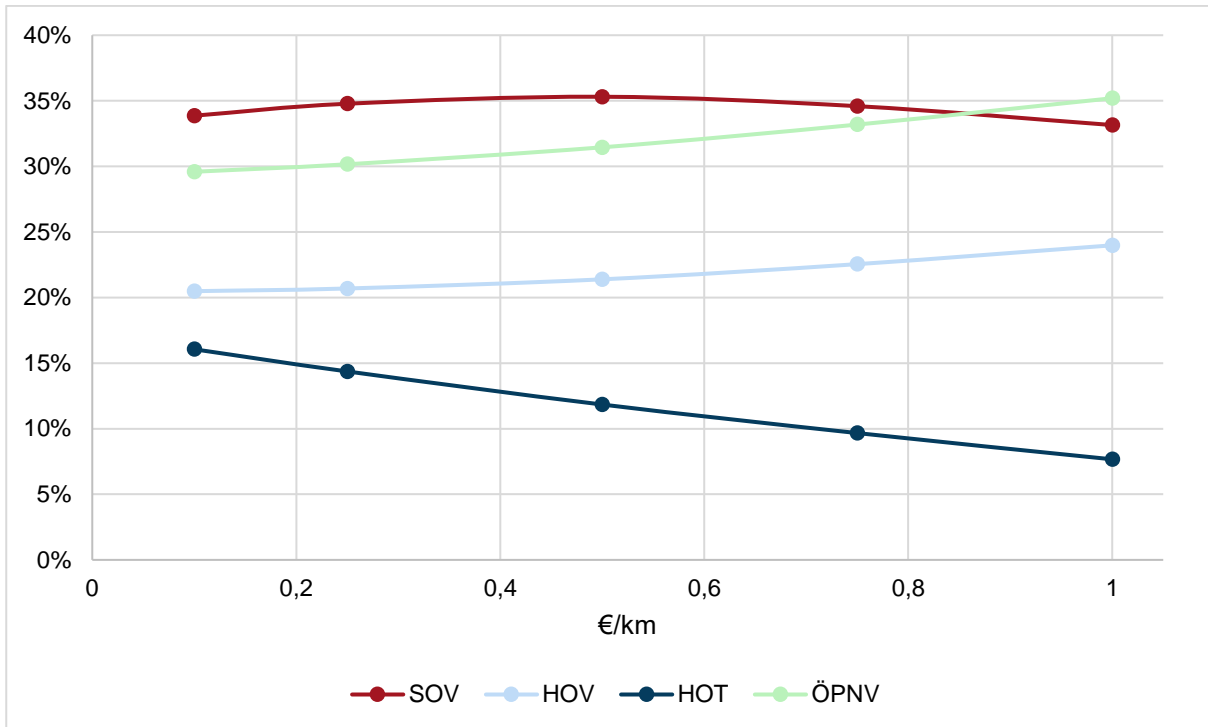


Abbildung 60: Modal Split Szenario 120 % AD 1 bis AD 6

Im Gegensatz zu Abbildung 60 mit einem langen Streckenabschnitt, wird in Abbildung 61 nur ein kurzer Streckenabschnitt ausgewertet. Betrachtet man die Abbildung, so wird deutlich, dass aufgrund der Kürze des Abschnitts kaum Änderungen durch die unterschiedlichen Kostensätze auftreten. Dies hat mehrere Gründe. Zum einen ist die Strecke zu kurz, um eine große Wirksamkeit zu entfalten. Mit einer Länge von rund 3,2 km zählt der Abschnitt zwar nicht zu den kürzesten des Netzwerks, allerdings können auch mit großen Geschwindigkeitsdifferenzen kaum nennenswerte Reisezeitgewinne erzielt werden. Zudem werden diese teilweise durch die Verflechtung von und auf die Managed Lane wieder konsumiert, so dass sich netto keine Reisezeitvorteile ergeben. Unter Berücksichtigung von Tabelle 9 sind Reisezeitgewinne im Bereich von insgesamt 30 Sekunden realistisch. Interessanterweise ist in Abbildung 61 der Verlauf von allen Verkehrsträgern annähernd konstant und die in den anderen Betrachtungen aufgetretenen Verlagerungen bei ÖPNV und Managed Lane bevorrechtigten Fahrzeugen fallen mit rund 2 % deutlich geringer aus. Dies könnte daran liegen, dass aufgrund der kurzen Gesamtstrecke nur geringe Gesamtkosten anfallen, die von den Pendlern als nicht maßgebend empfunden werden. Im Vergleich zu den vorherigen Fällen fällt zudem der sehr hohe Anteil von Alleinfahrern auf den regulären Fahrstreifen auf. Mit konstant 60 % Anteil liegt er beinahe doppelt so hoch wie im langen Streckenabschnitt zwischen Autobahndreieck 1 und Autobahndreieck 6. Der Anteil an SOV entspricht damit etwa dem des Nullfalls, ebenso bei den Fahrgemeinschaften.

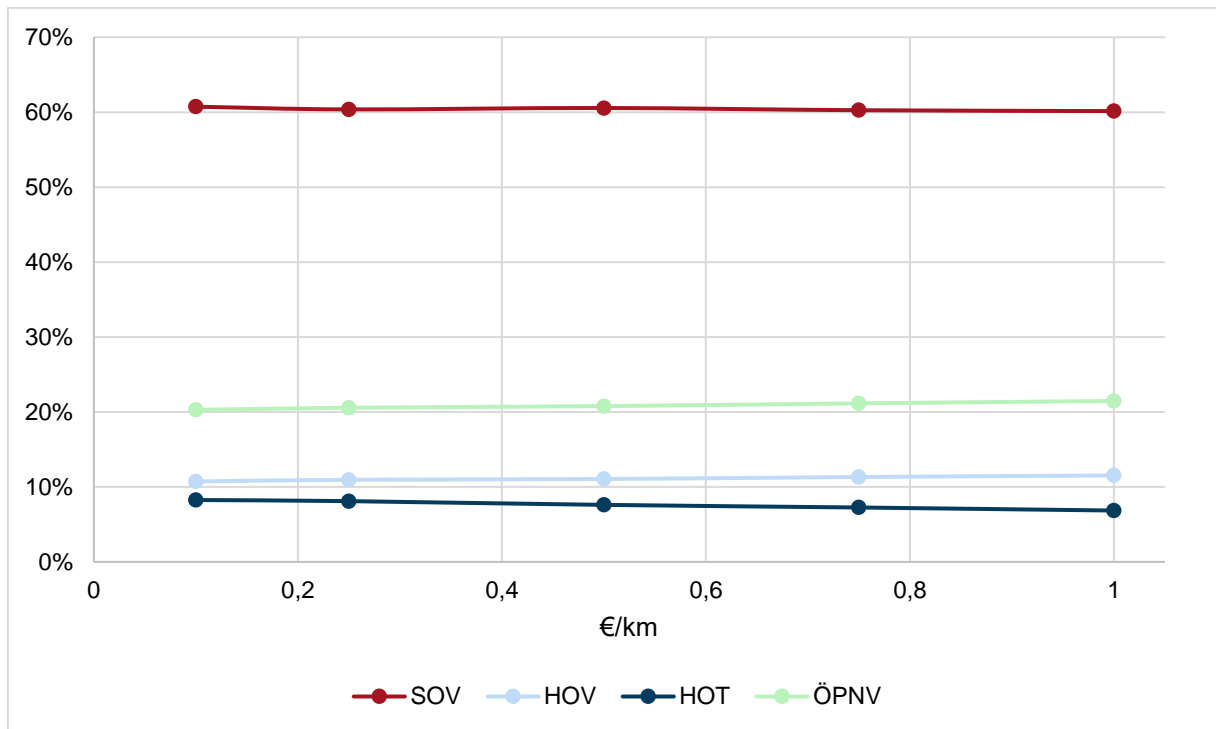


Abbildung 61: Modal Split Szenario 120 % AD 1 bis AS2

Reisezeit und Reisezeitgewinne

Ausgangspunkt für die Betrachtungen zu Reisezeit und Reisezeitgewinnen ist hier das Basis-Szenario für die Verkehrsbelastung 120 % QSV D. Wie im vorab behandelten Szenario mit 100 % QSV D liegt auch hier im Ausgangsfall keine Managed Lane vor, die als Referenz beispielsweise für HOT-Fahrzeuge oder Fahrgemeinschaften dienen kann. Stattdessen werden für HOT-Fahrzeuge die Werte der SOV-Fahrzeuge im Basis-Szenario herangezogen und HOV-Fahrzeuge weiterhin mit HOV-Fahrzeugen verglichen. Aufgrund der gemeinsamen Nutzung der regulären Fahrstreifen sind die Werte von SOV und HOV im Basis-Szenario jedoch praktisch identisch. Für den Schwerverkehr ergeben sich keine Änderungen, da dieser stets die regulären Fahrstreifen nutzen muss und in allen Szenarien in gleicher Form vorkommt.

In Abbildung 62 sind die durchschnittlichen Reisezeiten für das Gesamtnetz dargestellt. Schon auf den ersten Blick wird klar, dass für alle Verkehrsträger die Fahrtzeiten im Basis-Szenario am längsten sind. Zudem zeigt sich ein konstanter Rückgang der Reisezeiten bei steigenden Kostensätzen. Die Ursache liegt darin, dass bei den hohen Reisezeiten und großen Einsparpotenzialen viele Pendler auf den ÖPNV und in Fahrgemeinschaften wechseln, wie Abbildung 59 und Abbildung 60 zeigen. Die dadurch erreichbaren Reduktionen der Verkehrszahlen helfen, die Reisezeiten spürbar zu reduzieren. Auffällig ist, dass es Sprünge bei den Fahrtzeiten auf den regulären Fahrstreifen zwischen den Preisstufen 0,25 €/km und 0,5 €/km gibt. Auf der Managed Lane ist dieser Sprung auch erkennbar, allerdings in wesentlich geringerer Form. Generell liegen die Fahrtzeiten für Fahrzeuge auf der Managed Lane deutlich, um bis zu über 5 Minuten, unter denen der regulären Fahrstreifen. Aufgrund der

hohen Auslastung der reguläre Fahrstreifen bewegen sich die Geschwindigkeiten der SOV-Fahrzeuge und der LKW auf ähnlichem Niveau. Die hohe Verkehrsdichte verhindert wirksame Überholvorgänge und größere Geschwindigkeitsdifferenzen. Insgesamt sind die Einsparpotenziale über die verschiedenen Kostensätze auf den regulären Fahrstreifen um rund ein Drittel größer als auf der Managed Lane. Gegenüber dem Basis-Szenario sind erwartungsgemäß die Einsparungen der Managed Lane mit den Verkehrsträgern HOV und HOT deutlich größer. Die durchschnittlich sehr geringen Reisezeiten auf der Managed Lane lassen sich dadurch begründen, dass diese durch eine hohe Quote von ÖPNV-Nutzern und Fahrgemeinschaften weniger stark belastet wird.

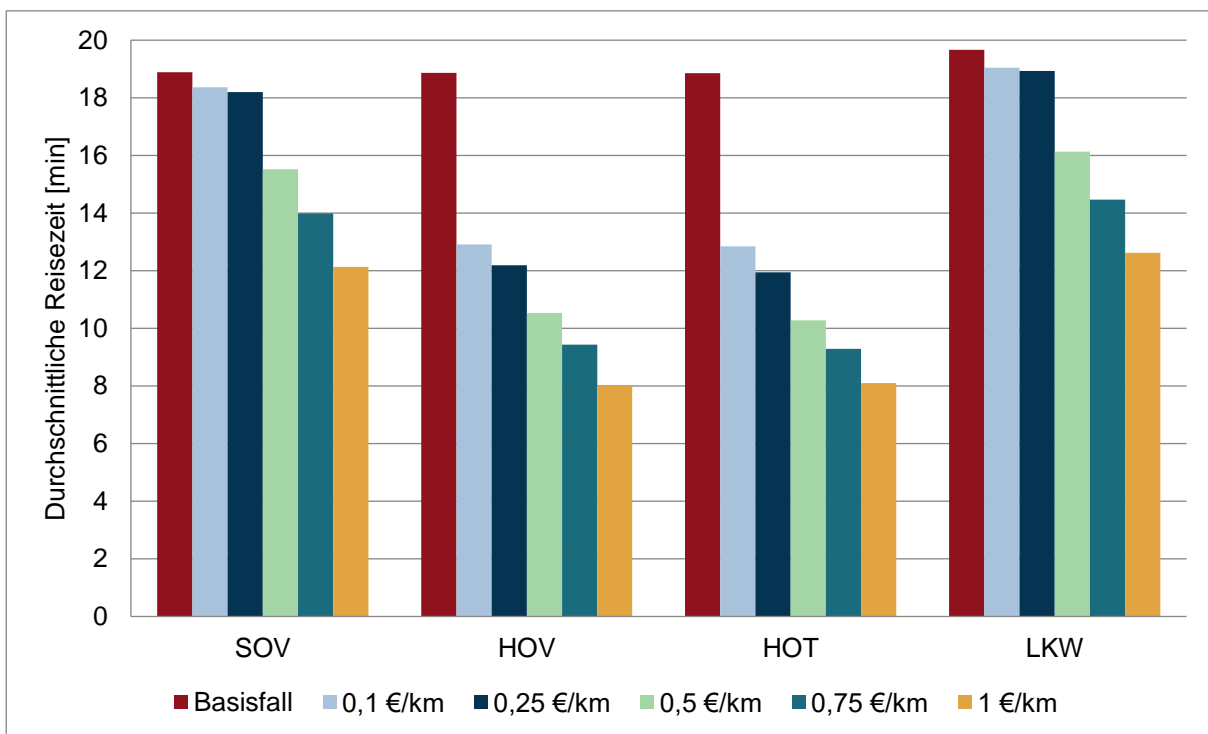


Abbildung 62: Durchschnittliche Reisezeit im Gesamtnetz für 120 % QSV D

Abbildung 63 zeigt die durchschnittlichen Reisezeiten für Fahrzeuge, die an Autobahndreieck 1 auffahren und an Autobahndreieck 6 abfahren, also eine längere Strecke auf der Autobahn zurücklegen. Im Vergleich zu Abbildung 62 ist zunächst zu beachten, dass die y-Achsen unterschiedlich skaliert sind und die Werte in Abbildung 63 beinahe doppelt so groß sind, wie bei den durchschnittlichen Reisezeiten im Gesamtnetz. Die Reisezeiten im Basis-Szenario überschreiten bis auf eine Ausnahme alle Reisezeiten in den unterschiedlichen Preissegmenten. Lediglich bei den Alleinfahrern auf den regulären Fahrstreifen ist die Reisezeit bei 0,5 €/km größer als im Basis-Szenario. Der Zeitsprung bei 0,5 €/km, der bei den Durchschnittswerten im Gesamtnetz aufgetreten ist, kann hier nicht mehr beobachtet werden. Im Bereich der Managed Lane scheinen die Kosten keinen oder nur einen untergeordneten Einfluss auf die Reisezeit zu haben. Hier treten die Unterschiede zwischen den Verkehrsträgern und nicht innerhalb der Kosten-Szenarien auf. Insbesondere bei den HOT-Nutzern bewegen sich die Reisezeiten bei Kosten zwischen 0,1 €/km und 0,75 €/km innerhalb

von 2 Minuten. Ähnlich gestaltet sich die Situation bei den HOV, auch wenn hier die Abweichungen in Summe 4 Minuten betragen. Einzig bei sehr hohen Kosten von 1 €/km lassen sich größere Änderungen in der Reisezeit feststellen. Demgegenüber lassen sich über die Nutzung der Managed Lane Reisezeitgewinne von bis zu 15 Minuten generieren. Wie bereits bei den durchschnittlichen Reisezeiten für das Gesamtnetz beschrieben, stellt sich auch hier der Effekt ein, dass die hohen potenziellen Reisezeitgewinne einen großen Anreiz zum Wechsel auf Fahrgemeinschaften und den ÖPNV bieten und die dadurch eingesparten Fahrzeuge einen sehr positiven Effekt auf die Reisezeit haben. Dabei zeigt sich, dass bei geringeren Straßennutzungsgebühren die Anreize für die Benutzung der Managed Lane zu bezahlen enorm sind und sich dies negativ im Gesamtsystem widerspiegelt.

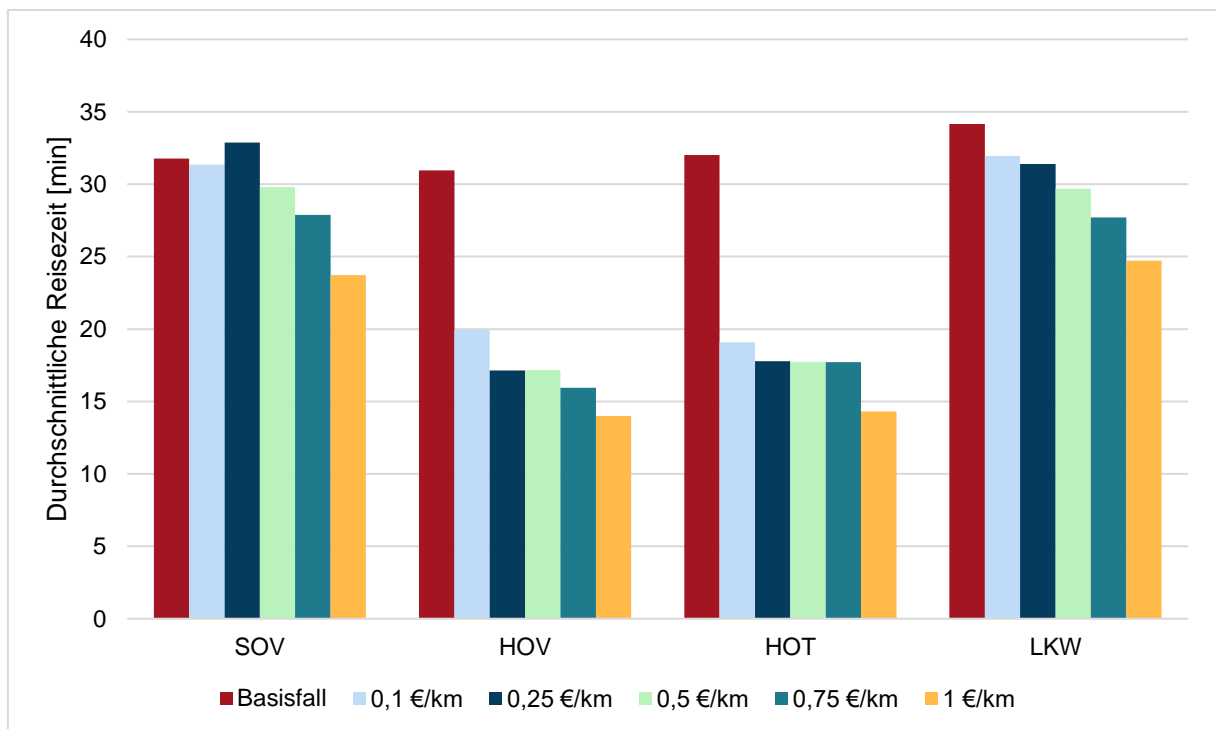


Abbildung 63: Durchschnittliche Reisezeit AD 1 bis AD 6 für 120 % QSV D

Für die Akzeptanz einer Managed Lane ist die Frage zentral, wie viele Personen davon profitieren und für wie viele Personen Nachteile entstehen. In Abbildung 64 ist dargestellt, wie viele Fahrzeuge durchschnittlich schneller fahren als im Basis-Szenario bei einer Verkehrsbelastung von 120 % QSV D und für wie viele Fahrzeuge es länger dauert. Diese Auswertung liefert jedoch keine Aussage zur Höhe der Reisezeitgewinne. In der Abbildung wird deutlich, dass Fahrgemeinschaften (HOV) und bezahlende Alleinfahrer (HOT) fast ausschließlich schneller sind als im Referenzszenario, unabhängig von der Höhe der Straßennutzungsgebühren. Da hierin ein zentrales Element der Managed Lane liegt, kann dies als positiv für einen potenziellen Projekterfolg gewertet werden. Interessant sind die Zahlen für die regulären Fahrstreifen, die von LKW und Alleinfahrern genutzt werden. Sind im Szenario 0,1 €/km noch ungefähr gleich viele Fahrzeuge schneller als langsamer, was der Ausgangslage im Basis-Szenario entspricht, reduziert sich dieser Anteil mit steigenden Kosten

stetig, bis im Szenario 1 €/km beinahe alle Fahrzeuge im Streckennetz schneller sind als im Ausgangsfall. Allerdings ist auch hier zu beobachten, dass zwischen den Szenarien 0,1 €/km und 0,25 €/km kaum ein Unterschied besteht, die Werte für SOV im teureren Szenario tendenziell sogar schlechter sind. Die Ursache hierfür dürfte sein, dass bei geringen Kosten auf der Managed Lane noch eine größere Anzahl an Pendlern auf die Möglichkeit der HOT-Lanes zurückgreift. Dies deckt sich auch mit den Beobachtungen in Abbildung 59 und Abbildung 60, dass die HOT-Fahrzeuge insbesondere ab 0,5 €/km deutlich zurückgehen. Die Ursache für den konstanten Rückgang ab 0,5 €/km ist erneut, dass bei hohen Kosten und gleichzeitig hohen potenziellen Reisezeitgewinnen Fahrgemeinschaften und der ÖPNV an Attraktivität gewinnen und es dadurch zu einer Reduktion der Fahrzeuge im Netz kommt. Dies führt in einem überlasteten Netz rasch zu einer spürbaren Entspannung im Verkehrsablauf. Betrachtet man die blauen Balken, die den Anteil an PKW (SOV, HOT und HOV) zeigen, die schneller sind als im Referenzszenario, so überrascht, dass insgesamt nur maximal rund ein Viertel der PKW-Pendler Reisezeitverluste in Kauf nehmen muss. Insbesondere bei höheren Kosten pro km steigt der Anteil der schnelleren Fahrzeuge sogar nochmals an.



Abbildung 64: Anteil an schnelleren (-) oder langsameren (+) Fahrzeugen verglichen mit Basis-Szenario 120 % QSV D

In den Abbildung 65 und Abbildung 66 sind beispielhaft für Alleinfahrer auf den regulären Fahrstreifen (SOV) und bezahlende Alleinfahrer (HOT) auf der Managed Lane, die zwischen AD 1 und AD 6 fahren, die minimalen und maximalen Fahrtzeiten angegeben. Das beinhaltet Fahrzeuge, die entweder bei A oder 1 auffahren und bei 6 oder B das Netz wieder verlassen. Die hellblaue Linie gibt als Referenzwert die durchschnittliche Reisezeit im Basisszenario für Fahrten von A nach B an. Da die Kurven der LKW, denen der SOV und die der HOV denen der HOT sehr stark ähneln, werden im Folgenden nur die beiden dargestellten Verkehrsträger

genauer betrachtet. Auffallend sind die großen Schwankungen zwischen den Minimal- und Maximalwerten, insbesondere bei den HOT-Fahrzeugen. Diese hängen stark davon ab, wie schnell sich ein Fahrzeug auf die Managed Lane verflechten und wie leicht es die Managed Lane wieder verlassen kann. Speziell bei Fahrzeugen, die an der hochbelasteten Abfahrt 6 das Netz verlassen möchten, können je nach Verkehrszustand deutliche Reisezeitverluste entstehen. Insgesamt liegen die minimalen Reisezeiten bei den HOT-Fahrzeugen deutlich unter denen der SOV und auch die maximalen Reisezeiten fallen geringer aus. Für das Szenario 1 €/km tritt der bereits mehrfach beobachtete Effekt auf, dass die gesunkenen Verkehrszahlen für einen besseren Verkehrsfluss sorgen, so dass hier für alle Verkehrsträger die maximalen Reisezeiten unter den durchschnittlichen Reisezeiten des Referenzfalls liegen. Betrachtet man die minimalen Reisezeiten der HOT-Fahrzeuge, erkennt man, dass diese über die unterschiedlichen Szenarien nur um rund 2 Minuten abnehmen. Die Managed Lane scheint damit schon sehr nah an ihrer optimalen Auslastung. Demgegenüber können die minimalen Reisezeiten bei den SOV um über 6 Minuten beschleunigt werden.

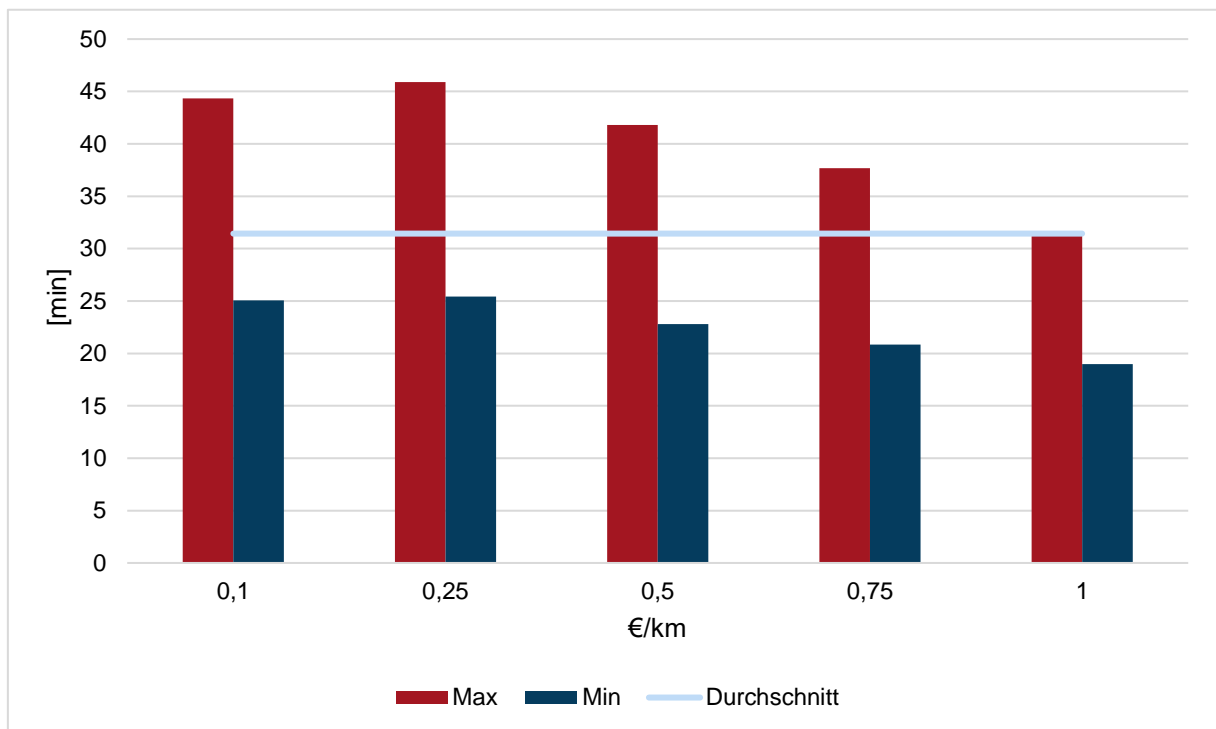


Abbildung 65: Minimale, Durchschnittliche und Maximale Fahrtzeit für SOV zwischen 1 und 6

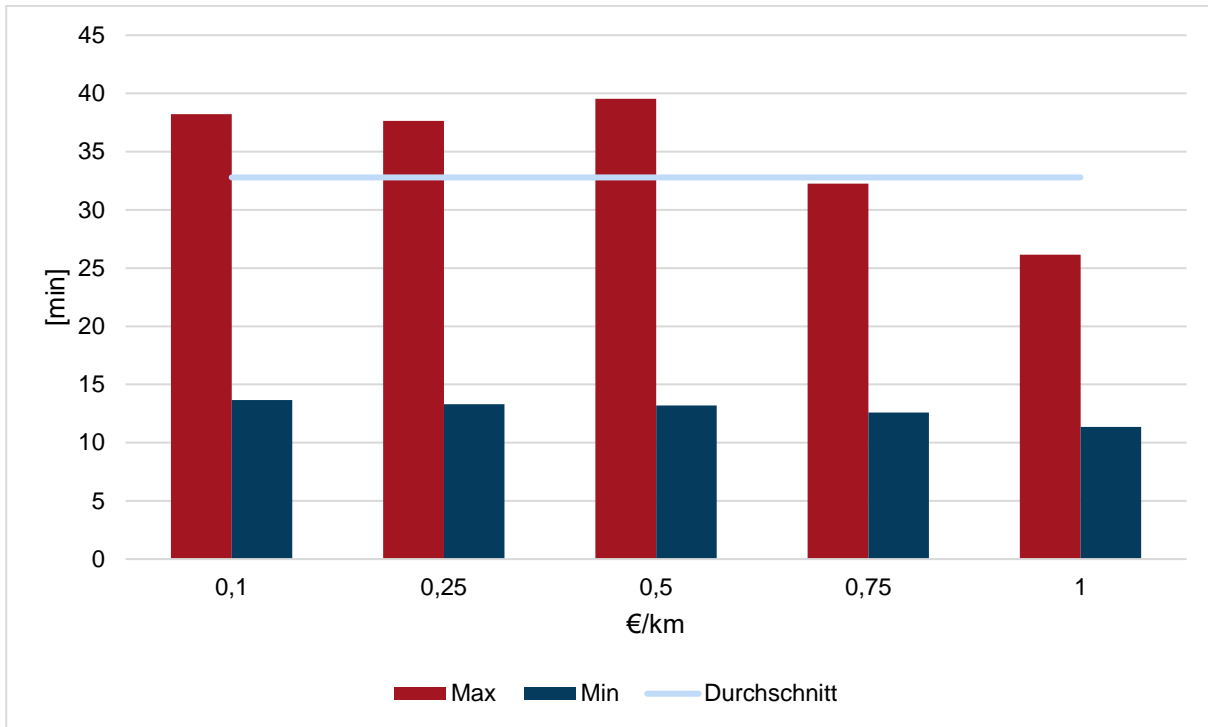


Abbildung 66: Minimale, Durchschnittliche und Maximale Fahrtzeit für HOT zwischen 1 und 6

4.4.4 Szenario 80 % QSV D

Wie die Erhöhung der Verkehrsbelastung um 20 % hat auch eine Reduktion der Verkehrsmenge um 20 % einen erheblichen Einfluss auf den Modal Split und den Verkehrsablauf. Reduziert man im Vergleich zum Basis-Szenario die Verkehrsbelastung auf 80 % der des QSV D, zeigt sich ein deutlich stabilerer und leichter Verkehrsablauf, der auch Auswirkungen auf mögliche Reisezeitgewinne und den Modal Split hat. Tabelle 10 zeigt die durchschnittlichen Reisezeiten für den Basisfall, also ohne Managed Lane. Im Vergleich zu den anderen Szenarien sind die Reisezeiten deutlich gesunken. Liegt die durchschnittliche Reisezeit für Fahrzeuge, die von A nach B fahren, im Szenario mit 100 % QSV D noch bei über 17 Minuten und bei einer Verkehrsbelastung von 120 % QSV D sogar bei mehr als 30 Minuten, sinkt dieser Wert im vorliegenden Fall auf etwas über 12 Minuten. Damit kann die durchschnittliche Reisezeit beinahe gedrittelt werden. Auch für den LKW-Verkehr sind die Reisezeiten deutlich geringer. Damit einhergehend ändern sich auch die Anreize auf den ÖPNV oder in eine Fahrgemeinschaft zu wechseln und damit Reisezeitvorteile zu erlangen.

Tabelle 10: Durchschnittliche Reisezeiten [min] für QSV 80 % im Basisfall

PKW	1 ab	2 ab	3 ab	4 ab	5 ab	6 ab	B ab
A zu	1,22	3,52	4,61	6,59	8,87	12,73	12,20
1 zu		3,18	4,27	6,16	8,32	12,85	12,07
2 zu			2,36	4,35	6,51	10,34	9,94
3 zu				3,34	5,55	9,57	8,92
4 zu					3,65	7,63	7,25
5 zu						5,50	5,05
6 zu							1,21
LKW	1 ab	2 ab	3 ab	4 ab	5 ab	6 ab	B ab
A zu	1,29	3,90	5,34	7,88	10,43	14,77	14,34
1 zu		3,43	4,84	7,45	9,33	14,55	14,17
2 zu			2,50	5,22	7,65	12,08	11,48
3 zu				3,69	6,31	10,48	10,37
4 zu					3,94	7,87	8,38
5 zu						6,01	5,66
6 zu							1,38

Die geringen Anreize das Verkehrsmittel zu wechseln, spiegelt sich auch im Modal Split für das Szenario wider, der in Abbildung 67 dargestellt ist. Dieser entspricht dem des Basis-Szenarios mit 100 % QSV D und weicht nur in sehr geringem Umfang von den Zahlen ab. Es kommt zu keiner Verlagerung zugunsten der Alleinfahrer und zu Lasten des ÖPNV und der Fahrgemeinschaften. Dies kann ein Zeichen dafür sein, dass hier eine Grenze der Verlagerungspotenziale erreicht wird und die Anreize für eine weitere Verschiebung des Modal Splits zugunsten des PKW sehr hoch sein müssten. Wie bereits in Kapitel 4.4.1 erläutert, stimmt der hier vorliegende Modal Split gut mit den aktuellen Zahlen zu den Anteilen der Verkehrsträger in Deutschland überein. Wie in der Abbildung deutlich ersichtlich ist, dominiert der PKW das Mobilitätsverhalten der Pendler in Deutschland, wenn es um längere Distanzen zwischen Wohnort und Arbeitsstelle geht. Addiert man die Fahrgemeinschaften, die ebenfalls die Straße nutzen, zu den PKW hinzu, werden 80 % des Pendelverkehrs über die Straße abgewickelt.

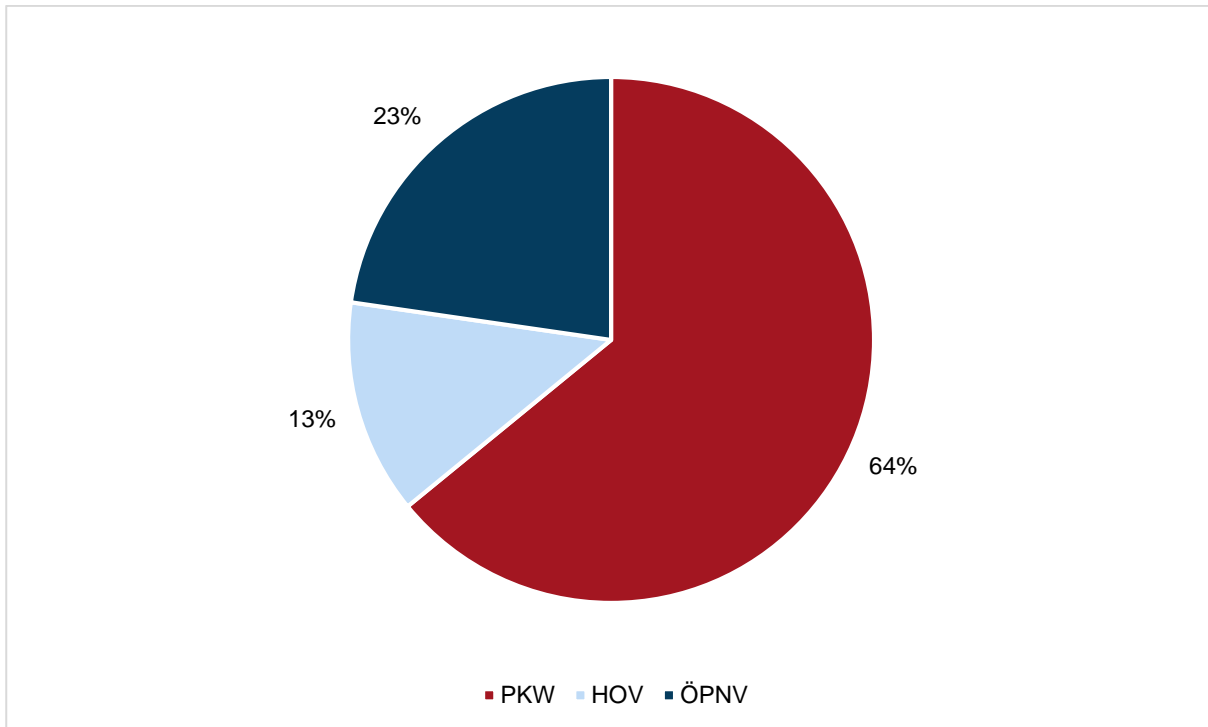


Abbildung 67: Modal Split Basis-Szenario für QSV D 80 %

Wie bereits für die Szenarien mit 100 % der QSV D und 120 % der QSV D wurden auch hier für das Szenario mit 80 % QSV D die optimalen Reisezeitgewinne ermittelt, bei denen die erwarteten Reisezeitgewinne mit den realen Reisezeitgewinnen übereinstimmen. Die Form der ermittelten Kurve erinnert auch hier an ein „gespiegeltes S“, wie in Abbildung 50. Über die verschiedenen Simulationsläufe zeigen sich erneut die kleineren Reisezeitgewinne volatil und sind anfällig für Abweichungen in Folge von Einzelereignissen, während sich die Abweichungen bei größeren Reisezeitgewinnen stabilisieren. Die Ergebnisse für einen Kostensatz von 0,5 €/km sind in Tabelle 11 dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die maximal erzielbaren Reisezeitgewinne mit rund 3,5 Minuten deutlich geringer ausfallen als in den Szenarien mit höheren Verkehrszahlen. Allgemein werden nur noch in 8 von 28 Fällen Reisezeitgewinne erreicht, die über der hier festgelegten Relevanzschwelle von 2 Minuten liegen. Für die große Mehrzahl an Verbindungen bringt die Managed Lane keine oder nur geringfügige Vorteile, was auch Einfluss auf das Verlagerungspotenzial zugunsten von ÖPNV und Fahrgemeinschaften hat. Die Ursache hierfür liegt hauptsächlich darin, dass aufgrund der geringeren Verkehrsmenge vermutlich eine Qualitätsstufe C oder B nach HBS 2015 erreicht wird, was bedeutet, dass der Verkehr nahezu frei fließen kann oder die Fahrzeuge zumindest nur geringfügig von anderen Verkehrsteilnehmern beeinflusst werden (FGSV 2015). Die Verkehrsqualität ist damit nicht oder nur geringfügig schlechter als auf der Managed Lane.

Tabelle 11: Reisezeitgewinne [min] für 0,5 €/km bei Szenario 80 % QSV D

	1 ab	2 ab	3 ab	4 ab	5 ab	6 ab	B ab
A zu	0,06	0,59	0,91	1,22	1,59	3,12	3,52
1 zu		0,14	0,61	1,00	1,01	2,74	3,45
2 zu			0,05	0,54	1,13	2,16	2,90
3 zu				0,17	0,70	1,90	2,56
4 zu					0,19	1,71	2,31
5 zu						1,13	1,74
6 zu							0,01

Verkehrsverlagerung und Modal Split

In Abbildung 68 ist der Modal Split über die verschiedenen Preis-Szenarien für eine Verkehrsbelastung von 80 % QSV D dargestellt. Wie aufgrund der geringen potenziellen Reisezeitgewinne zu erwarten war, gibt es über die verschiedenen Szenarien nur geringe Verschiebungen im Modal Split und keine Abnahme des PKW-Verkehrs. Der Anteil der Alleinfahrer auf den regulären Fahrstreifen (SOV) bleibt durchgehend konstant, von Schwankungen unter 1 % abgesehen und liegt über 50 % der Pendlerfahrten. Der Anteil an Fahrern, die bereit sind, für Reisezeitvorteile zu bezahlen, nimmt erwartungsgemäß mit steigenden Kosten ab und sinkt von 10 % auf 4 %. Diese Verluste fangen überwiegend die Fahrgemeinschaften und der ÖPNV auf, die ihre Anteile von 13 % auf 15 % bzw. von 23 % auf 26 % steigern können. Verglichen mit dem Basis-Szenario bei 80 % QSV D, bei dem noch keine Managed Lane implementiert ist, können die Fahrgemeinschaften und der ÖPNV ihre Anteile bei geringen Kostensätzen um jeweils ca. 3 % steigern und diesen Wert im Verlauf über die steigenden Kosten auf rund 5 % bis 6 % steigern. Die vorhandenen Reisezeitvorteile, die über die Managed Lane generiert werden können, zeigen also auch in diesem Fall, bei dem die Reisezeit-Potenziale gering sind, eine gewisse Wirkkraft. Dennoch wird an dieser Stelle sehr deutlich, dass die Potenziale einer HOT-Lane je geringer sind, umso besser der Verkehrsfluss auf der Strecke ist.

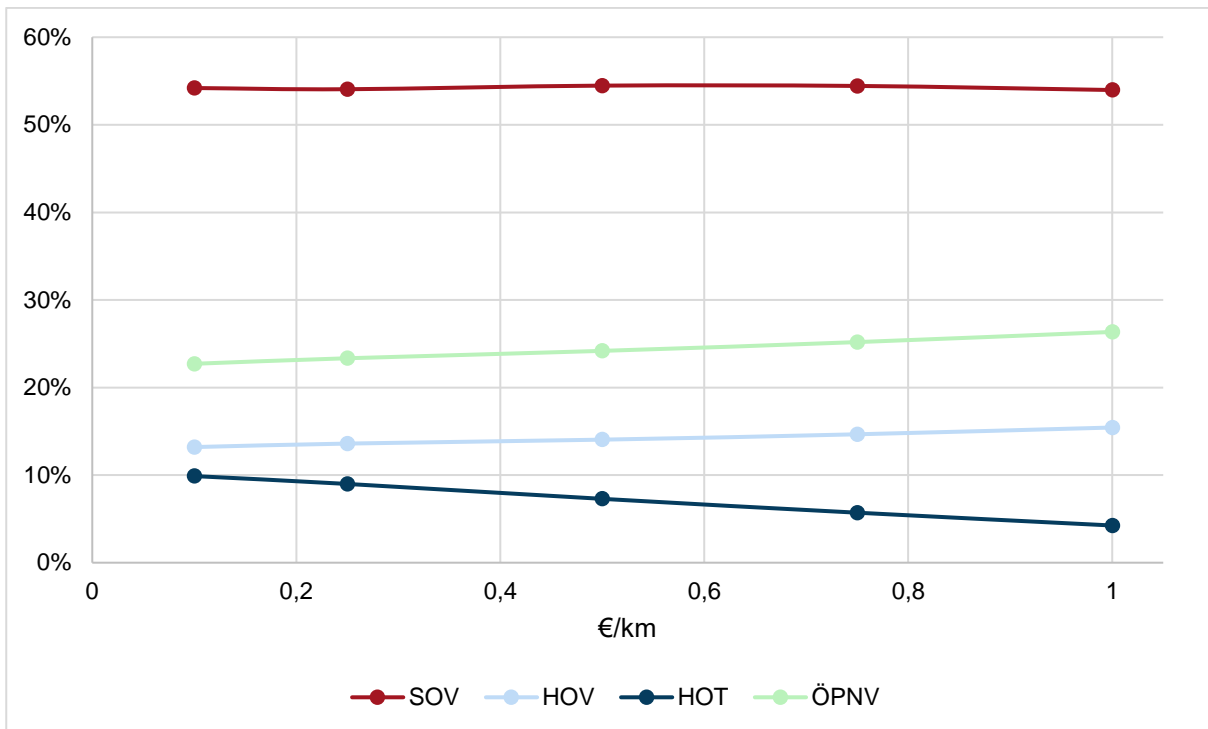


Abbildung 68: Modal Split Gesamtnetz für 80 % QSV D

In Abbildung 69 ist der Modal Split für die Fahrzeuge angegeben, die von Autobahndreieck 1 nach Autobahndreieck 6 fahren. Grundsätzlich zeigen sich ähnliche Verläufe der Kurven, wie in Abbildung 68, wobei das Niveau der Fahrgemeinschaften und des ÖPNVs etwas höher ist und der Anteil der Alleinfahrer auf den regulären Fahrstreifen etwas geringer. Aufgrund der geringen Reisezeitgewinne ist die Option für die Nutzung der Managed Lane, insbesondere bei höheren Preisen sehr unattraktiv. Bei Kosten von 1 €/km sinkt der HOT-Anteil auf unter 2 %. Der Anteil der SOV-Fahrzeuge bleibt über die verschiedenen Preisklassen weitestgehend konstant, die Abweichungen bewegen sich im Bereich von 1 %. Die Veränderungen bei den Anteilen ergeben sich nur unter den Berechtigten der Managed Lane. Werden die Strecken kürzer, beispielsweise für Fahrten von AD 1 nach AS 2, reduziert sich der Einfluss der Kosten noch weiter. Für Fahrten von 1 nach 2 betragen beispielsweise bei allen Verkehrsträgern die Änderungen nicht mehr als 1 %. Zudem ist die Bereitschaft zu bezahlen nur sehr gering ausgeprägt, da die Vorteile, die erzielt werden können, nur sehr gering sind und sich im Sekundenbereich bewegen. Hierbei liegt der Anteil der SOV-Fahrten mit mehr als 60 % noch höher, während alle anderen Verkehrsträger unattraktiver werden. Insgesamt unterscheiden sich die Werte kaum von denen des Basis-Szenarios.

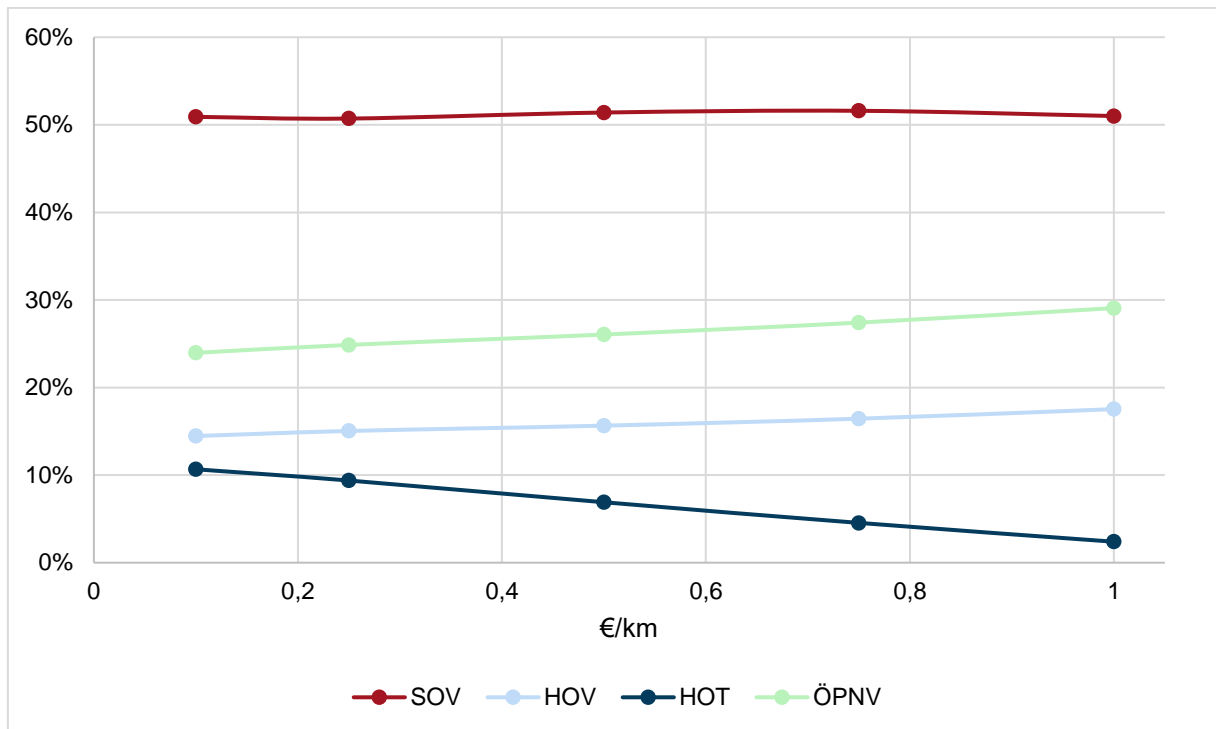


Abbildung 69: Modal Split AD 1 bis AD 6 für 80 % QSV D

Reisezeit und Reisezeitgewinne

Als Referenz für die Reisezeit und die Reisezeitgewinne dient hier das Basis-Szenario für den Fall mit einer Verkehrsbelastung von 80 % der QSV D. In diesem liegt, wie in den anderen Basis-Szenarien, keine Managed Lane vor, die als Referenz beispielsweise für HOT-Fahrzeuge oder Fahrgemeinschaften dienen kann. Daher werden für HOT-Fahrzeuge erneut die Werte der SOV-Fahrzeuge im Basis-Szenario herangezogen und HOV-Fahrzeuge weiterhin mit HOV-Fahrzeugen verglichen. Aufgrund der gemeinsamen Nutzung der regulären Fahrstreifen sind die Werte von SOV und HOV im Basis-Szenario weiterhin praktisch identisch. Für den Schwerverkehr ergeben sich keine Änderungen, da dieser stets die regulären Fahrstreifen nutzen muss und in allen Szenarien in gleicher Form vorkommt.

In Abbildung 70 wird die durchschnittliche Reisezeit aller Fahrzeuge im Gesamtnetz abgebildet. Hier zeigt sich, dass Alleinfahrer auf den regulären Fahrstreifen sowie LKW im Basis-Szenario die geringste Fahrtzeit haben und über die verschiedenen Kostenszenarien Einbußen bei der Reisezeit in Kauf nehmen müssen. Im Vergleich zu anderen Szenarien fallen die Abweichungen allerdings geringer aus und liegen maximal im Bereich von 2 Minuten. Fahrgemeinschaften und Fahrzeuge, die bereit sind für die Nutzung der Managed Lane zu bezahlen, können hingegen im Vergleich zum Basis-Szenario in allen Kostenfällen ihre Reisezeit reduzieren. Allerdings sind diese Gewinne mit maximal 30 Sekunden ausgesprochen gering und damit anfällig für Verluste durch unvorhergesehene Ereignisse. Es darf durchaus bezweifelt werden, ob solche Reisezeitgewinne geeignet sind, einen Anreiz zum Wechsel des Verkehrsmittels darzustellen. Allgemein liegen alle Verkehrsträger, die auf dem

PKW basieren innerhalb von 2 Minuten oder weniger, so dass sich hier der Verkehrsfluss sehr homogen und auf den regulären Fahrstreifen und der Managed Lane vergleichbar darstellt.

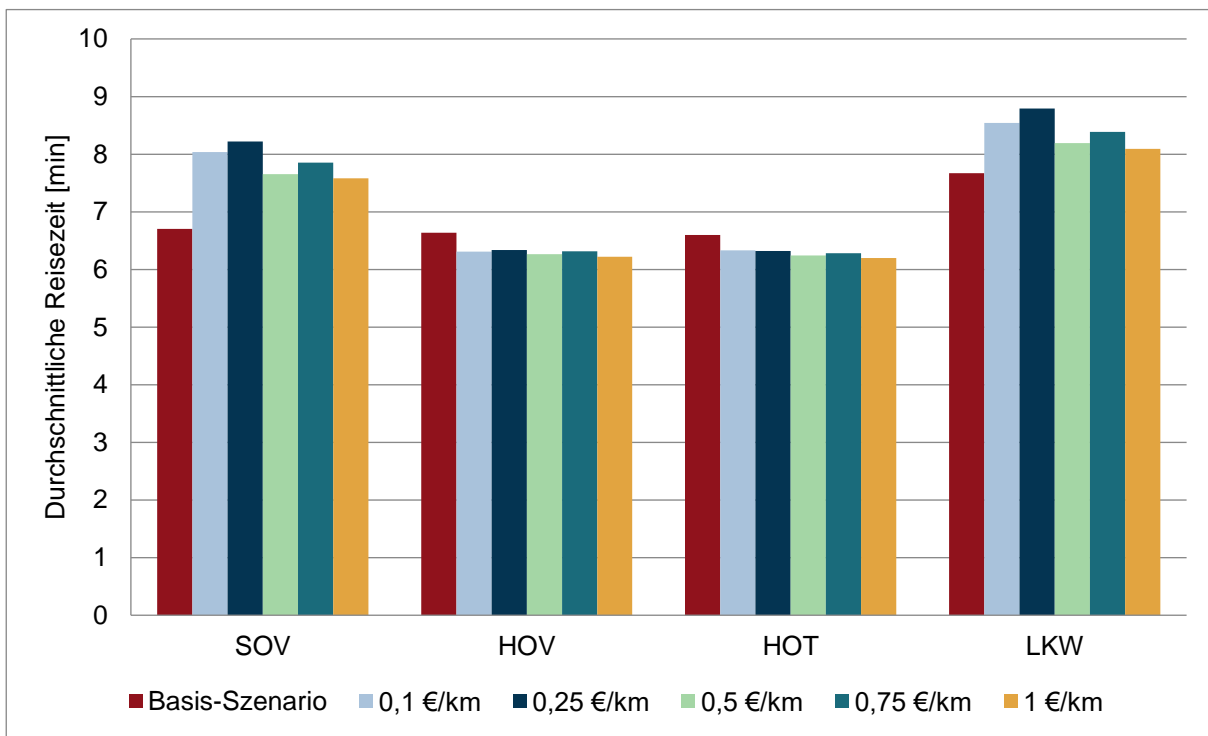


Abbildung 70: Durchschnittliche Reisezeit im Gesamtnetz für 80 % QSV D

Abbildung 71 zeigt die durchschnittlichen Reisezeiten für Fahrten von Autobahndreieck 1 nach Autobahndreieck 6 für eine Verkehrsbelastung von 80 % QSV D. Erneut sind die Reisezeiten des Basis-Szenarios für die SOV und den LKW-Verkehr geringer als bei den Szenarien mit Managed Lanes. Die Reisezeitunterschiede liegen dabei bei den verschiedenen Kostenszenarien maximal 3 Minuten, meist jedoch bei 2 Minuten oder sogar darunter. Damit sind diese Reisezeitdifferenzen sehr anfällig für Einzelereignisse, die zu größeren Abweichungen bei den Verhältnissen führen können. Demgegenüber sind die Reisezeiten für Nutzer der Managed Lane durchgängig über alle Kostensätze niedriger als im Basis-Szenario. Allerdings betragen die Zeitvorteile maximal 1 Minute und liegen durchschnittlich sogar nur bei 30 Sekunden. Auch diese Reisezeitgewinne sind nur sehr gering ausgeprägt und anfällig bei unvorhergesehenen Ereignissen. Generell können Nutzer der Managed Lane gegenüber den regulären Fahrstreifen Reisezeitvorteile von durchschnittlich 2 bis 4 Minuten erreichen, wobei diese durch Verzögerungen auf den regulären Fahrstreifen entstehen und weniger durch eine Beschleunigung der Reisezeiten auf der Managed Lane.

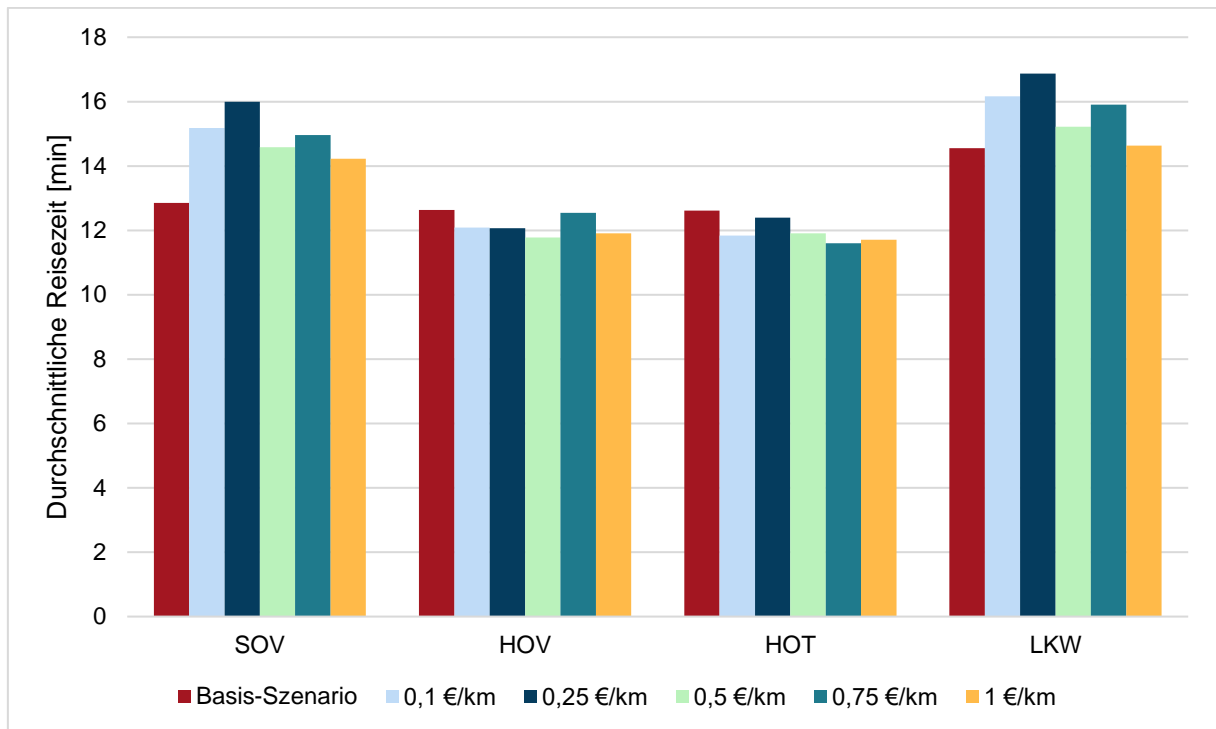


Abbildung 71: Durchschnittliche Reisezeit AD 1 bis AD 6 für 80 % QSV D

In Abbildung 72 ist dargestellt, für welchen Anteil an Pendlern die Managed Lane in den verschiedenen Szenarien bei einer Verkehrsbelastung von 80 % QSV D Reisezeitvorteile bringt und für wie viele Verluste. Dabei ist zu beachten, dass die Tatsache, dass es zu Reisezeitverlusten kommt, noch nichts über deren Höhe aussagt. Grundsätzlich ist für die Akzeptanz eines Projekts entscheidend, ob und in welchem Umfang Reisezeitverluste entstehen. Berücksichtigt man den Modal Split, so ist hier festzustellen, dass über 60 % der Pendler Reisezeitverluste hinnehmen müssen. Wie bereits in den vorangegangenen Auswertungen zum Szenario 80 % QSV D Verkehrsstärke sind die Werte über die Kostenszenarien relativ konstant. Lediglich der Schwerverkehr zeigt über die unterschiedlichen Kostensätze mit steigenden Kosten eine Zunahme der Fahrzeuge, die Reisezeitgewinne generieren können. Bei Alleinfahrern auf den regulären Fahrstreifen pendelt der Wert derjenigen, die mehr Zeit benötigen, zwischen 91 % und 92 %. Bei den Nutzern der Managed Lane erreichen 97 % bis 99 % eine kürzere Fahrtzeit.

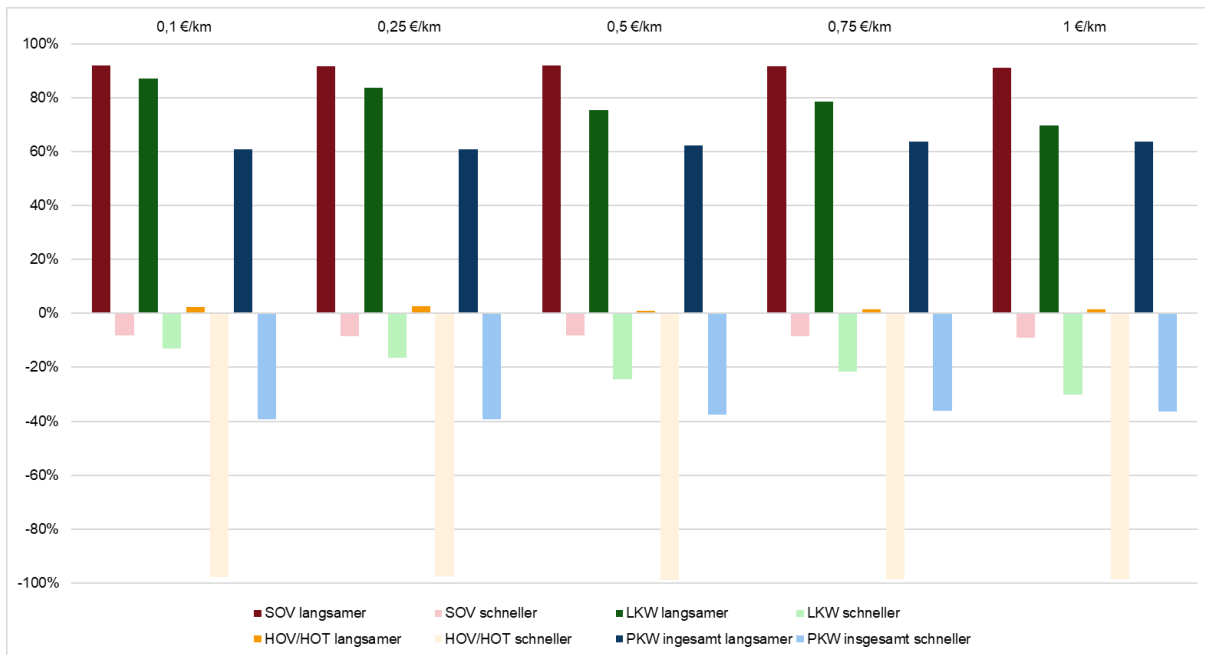


Abbildung 72: Anteil an schnelleren (-) oder langsameren (+) Fahrzeugen verglichen mit Basis-Szenario

In den Abbildung 73 und Abbildung 74 sind beispielhaft für Alleinfahrer auf den regulären Fahrstreifen (SOV) und Fahrgemeinschaften (HOV) auf der Managed Lane, die zwischen AD 1 und AD 6 fahren, die minimalen und maximalen Fahrtzeiten angegeben. Das beinhaltet Fahrzeuge, die entweder bei A oder 1 auffahren und bei 6 oder B das Netz wieder verlassen. Die hellblaue Linie gibt als Referenzwert die durchschnittliche Reisezeit im Basisszenario für Fahrten von A nach B an. Da die Kurven der LKW denen der SOV und die der HOV denen der HOT sehr stark ähneln, werden im Folgenden nur die beiden dargestellten Verkehrsträger genauer betrachtet. Dabei fällt auf, dass die minimalen und maximalen Reisezeiten bei den SOV einen deutlich geringeren Abstand haben als bei den HOV. Generell sind die Unterschiede zwischen der minimalen und maximalen Fahrtzeit mit rund 5 Minuten nur schwach ausgeprägt, wenn man die Länge der Strecke und die möglichen Behinderungen berücksichtigt. Allerdings liegen auch die geringsten gefahrenen Reisezeiten unter den durchschnittlichen Reisezeiten des Basis-Szenarios ohne Managed Lane. Bei den Fahrgemeinschaften sind die Reisezeitunterschiede maximal 6 Minuten stark, allerdings auf einem geringeren Niveau der Reisezeit. Die allgemein größeren Unterschiede bei den HOV hängen stark davon ab, wie schnell sich ein Fahrzeug auf die Managed Lane verflechten und wie leicht es die Managed Lane wieder verlassen kann. Insbesondere bei Fahrzeugen, die an der hochbelasteten Abfahrt 6 das Netz verlassen möchten, können je nach Verkehrszustand deutliche Reisezeitverluste entstehen.

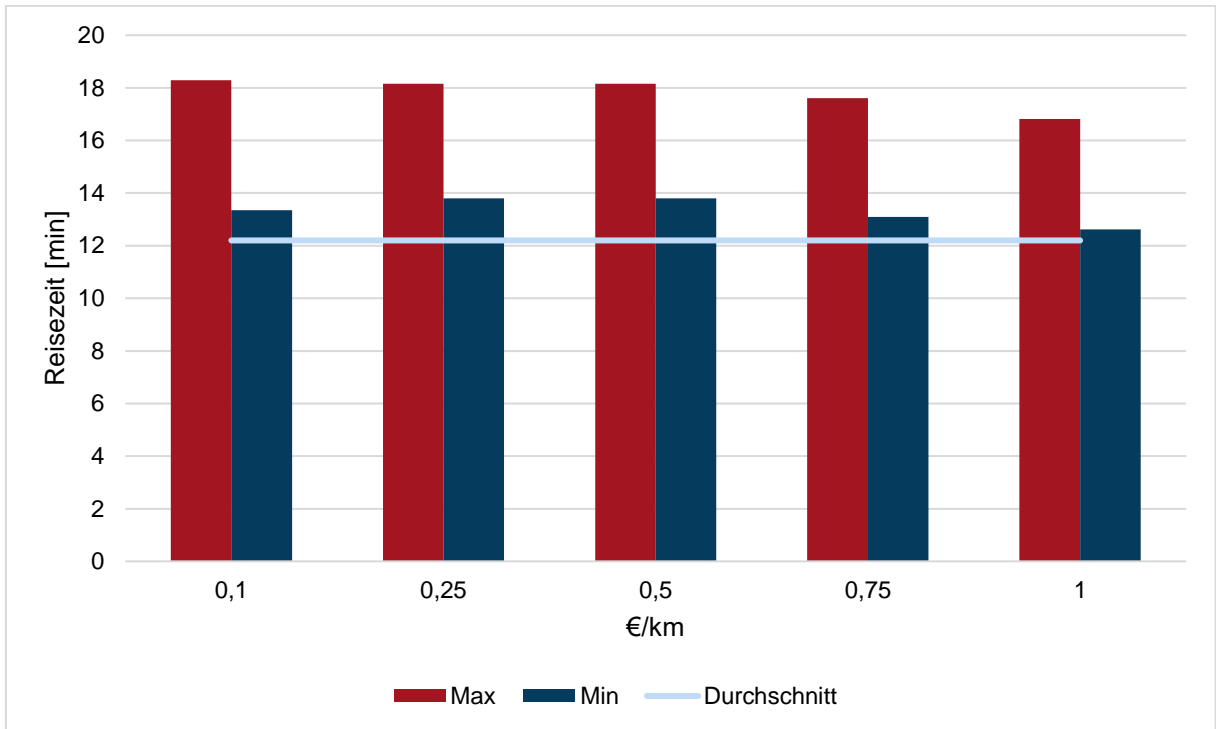


Abbildung 73: Minimale, Durchschnittliche und Maximale Fahrtzeit für SOV zwischen 1 und 6

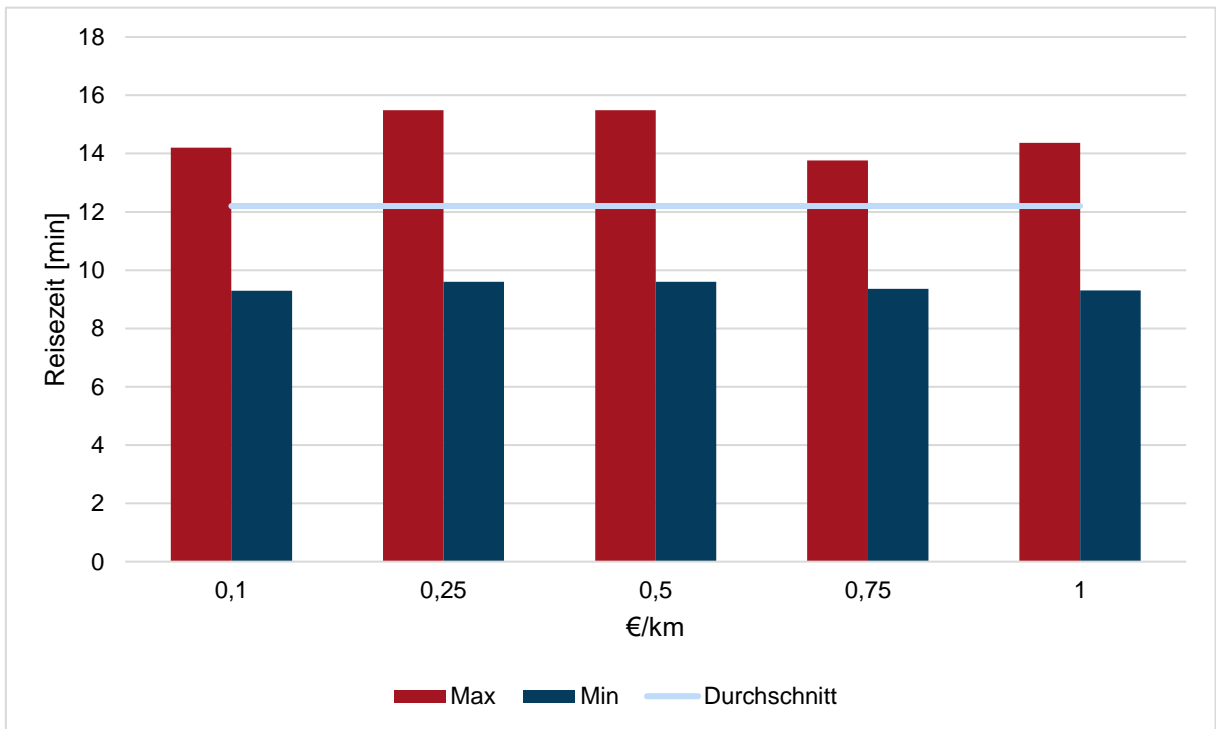


Abbildung 74: Minimale, Durchschnittliche und Maximale Fahrtzeit für HOV zwischen 1 und 6

4.5 Auswertung

Neben den Ergebnissen der einzelnen Simulationen ist es vorrangig von Bedeutung, wie sich die Werte über verschiedene Belastungsstufen entwickeln. Hieraus lassen sich Erkenntnisse zu Wirksamkeit unter verschiedenen Rahmenbedingungen und Einsatzempfehlungen ableiten.

4.5.1 Reisezeit und Reisezeitpotenziale

Dass die Verkehrsdichte einen erheblichen Einfluss auf die Reisezeit hat, ist absolut unstrittig und mit unterschiedlichen Methoden bewiesen (Guessous et al. 2014; Pipes 1967). Am prominentesten sind hier möglicherweise die Fundamentaldiagramme, mit denen ab den 1930er-Jahren der Zusammenhang zwischen Verkehrsfluss, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit beschreibt (Greenshields et al. 1935). Dieses Ergebnis zeigt sich auch in den hier durchgeführten Simulationen. Abbildung 75 zeigt die durchschnittlichen Reisezeiten über die unterschiedlichen Verkehrsträger für Fahrten von A nach B im Basis-Szenario bei den verschiedenen Verkehrsmengen von 80 % bis 120 % QSV D. Geht die Verkehrsmenge deutlich über die der QSV D hinaus, so verdoppeln sich die Reisezeiten. Demgegenüber nehmen die Reisezeiten bei geringeren Verkehrsmengen auch ab, allerdings in geringerem Umfang, als sie bei einer Zunahme steigen. Dennoch sind Reisezeitgewinne von bis zu 30 % möglich. Für die Entwicklung der Reisezeiten ist der Verkehrsträger nicht relevant, sondern gleichen sich stets.

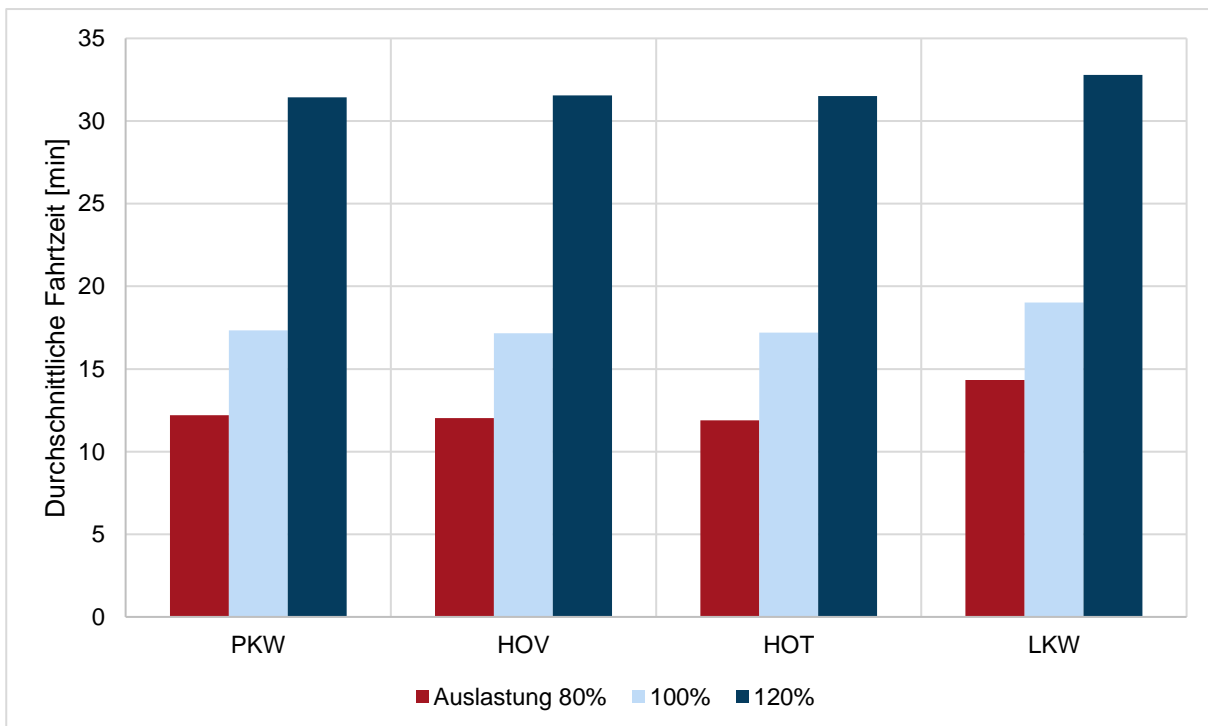


Abbildung 75: Durchschnittliche Fahrtzeit von A nach B im jeweiligen Basis-Szenario

Die stark voneinander abweichenden Fahrtzeiten spiegeln sich auch in den Potenzialen zu möglichen Reisezeitgewinnen einer Managed Lane wider, wie Abbildung 76 zeigt. Für Fahrten durch den kompletten Streckenzug von A nach B lassen sich über die verschiedenen Kostenszenarien bei einer Verkehrsbelastung von 80 % QSV D durchschnittlich Reisezeitgewinne von 4 Minuten generieren. Demgegenüber können bei einer Verkehrsbelastung von 120 % QSV D auf der Managed Lane bis zu 16 Minuten Reisezeitgewinn generiert werden, was eine Vervierfachung des Wertes entspricht. Die Werte für eine QSV D von 100 % bewegen sich mit 8 Minuten bis 11 Minuten erwartungsgemäß zwischen denen der alternativen Verkehrsstärken, tendieren aber eher zu den höheren Werten. Dabei ist allgemein mit steigenden Preisen eine Abnahme der potenziellen Reisezeitgewinne zu beobachten. Diese liegt darin, dass höhere Preise die Anreize für Fahrgemeinschaften und den ÖPNV erhöhen und die dadurch reduzierte Verkehrsnachfrage wiederum einen positiven Effekt auf die Reisezeiten hat. Zudem haben die verschiedenen Kurven keinen parallelen Verlauf. Insbesondere bei erhöhten Verkehrszahlen zeigt sich im Bereich von 0,25 €/km ein Anstieg der Reisezeitpotenziale. Dieser wird bereits in Kapitel 4.4.3 in den Auswertungen deutlich und analysiert.

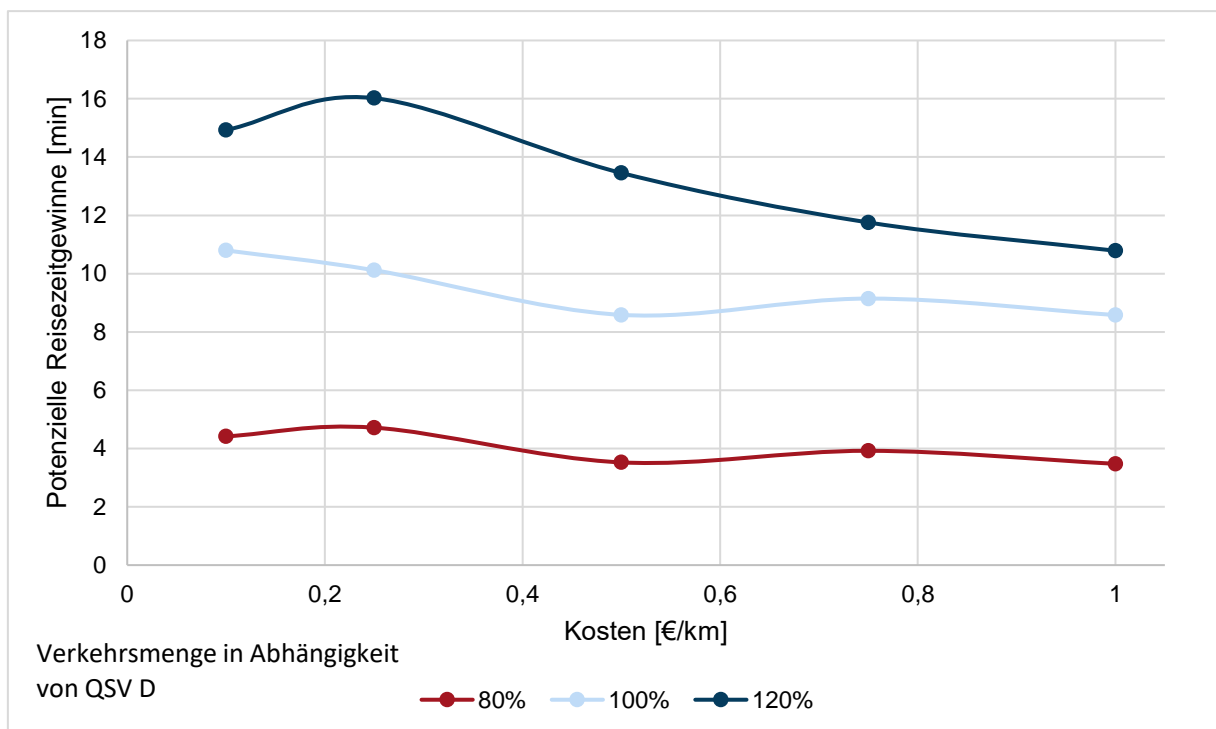


Abbildung 76: Potenzielle Reisezeitgewinne für Fahrten von A nach B

Wie bereits in den vorstehenden Kapiteln erläutert, ist für die Akzeptanz einer Managed Lane unter anderem ausschlaggebend, wie viele Pendler im Vergleich zum Basis-Szenario von der Managed Lane profitieren und für wie viele es länger dauert. In Abbildung 77 sind die Erkenntnisse aus Abbildung 56, Abbildung 64 und Abbildung 72 zusammengefasst. Die Daten zeigen, dass es für die Nutzer der Managed Lane in diesem Fall keine Bedeutung hat, wie stark die Verkehrsbelastung der Strecke ist und welches Kostenregime gewählt wurde, sie

profitieren in nahezu allen Konstellationen von geringeren Reisezeiten. Für die Fahrzeuge auf den regulären Fahrstreifen hat die Managed Lane dagegen häufig negative Auswirkungen. Hierzu zeigt sich auch ein größerer Einfluss der Verkehrsstärke und des Kostenregimes. Dabei zeigt sich, dass bei einer geringeren Verkehrsstärke mehr Pendler mit längeren Reisezeiten konfrontiert sind und dieser Anteil mit steigenden Kosten sowie einer höheren Verkehrsstärke abnimmt. Die großen Anreize bei hohen Reisezeiten und ggf. hohen Kosten das Transportmittel zugunsten von ÖPNV und Fahrgemeinschaften zu wechseln, führen in diesen Fällen dazu, dass im Vergleich zum Basis-Szenario nur ein geringer Anteil an Personen länger benötigt. So sinkt der Anteil der Alleinfahrer auf den regulären Fahrstreifen, die für ihren Arbeitsweg länger brauchen, von rund 90 % bei 0,1 €/km und 80 % Verkehrsbelastung der QSV D auf etwas über 50 % bei 0,1 €/km bei 120 % Verkehrsbelastung QSV D. Mit rund 1 % ist der Anteil der SOV die länger benötigen schließlich bei Kosten von 1 €/km am geringsten. Hier zeigt sich erneut, dass Managed Lanes insbesondere bei hohen Verkehrsstärken und einer starken Ausgangsbelastung gute Potenziale hat.

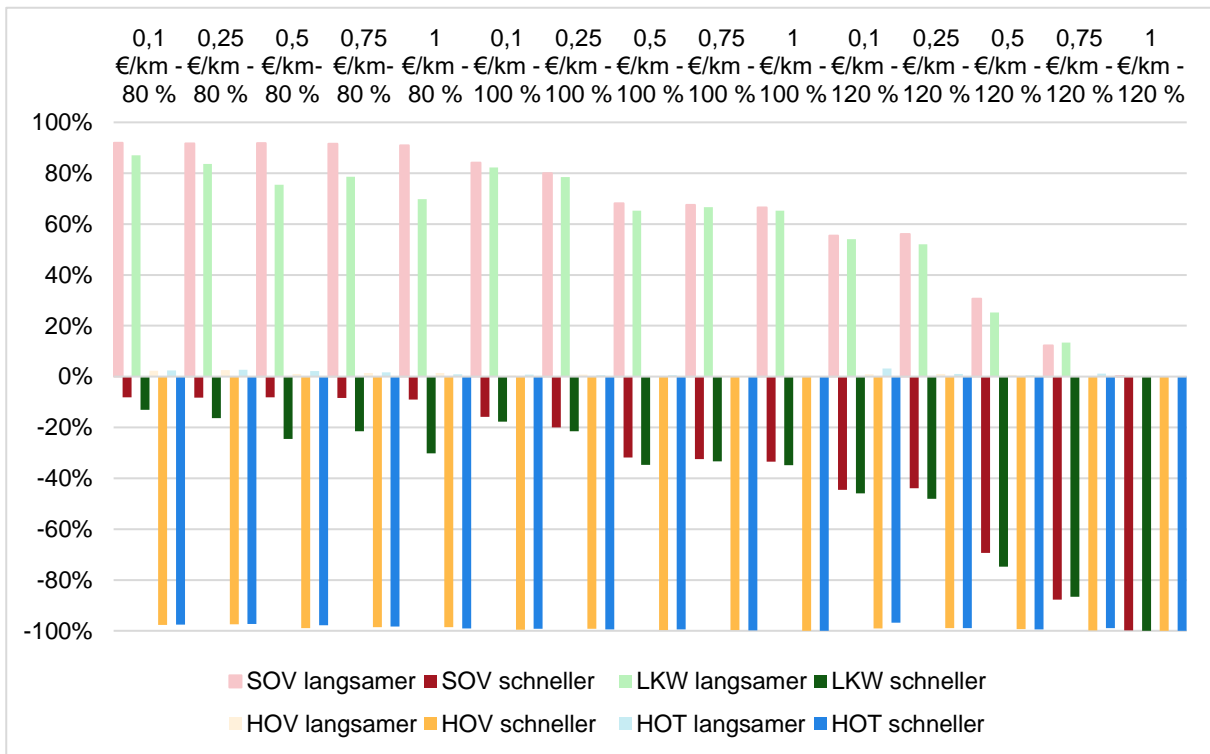


Abbildung 77: Anteil an Fahrzeugen, die im Vergleich zum Basis-Szenario schneller oder langsamer sind

In Abbildung 78 sind die durchschnittlichen Reisezeiten über alle Verkehrsbelastungen und Kostensätze für Alleinfahrer auf den regulären Fahrstreifen und Fahrgemeinschaften auf der Managed Lane angegeben. Die Verläufe der LKW ähneln sehr stark denen der SOV und die der HOT-Fahrzeuge denen der HOV-Fahrzeuge. Daher wird im Folgenden sowie den nächsten Abbildungen nur auf die SOV und HOV-Verläufe eingegangen. Dabei zeigt sich, dass Reisende im SOV im Basis-Szenario bei niedriger und mittlerer Verkehrsstärke über alle Szenarien hinweg Reisezeitverluste durch die Managed Lane erleiden, während bei einer

hohen Verkehrsstärke durch die Managed Lane durchwegs positive Effekte zu verzeichnen sind. Die Effekte der Bepreisung sind bei unteren und mittleren Verkehrsstärken nur schwach ausgeprägt. Demgegenüber nehmen die durchschnittlichen Reisezeiten der SOV-Fahrzeuge bei einer hohen Verkehrsbelastung mit steigenden Kostensätzen um mehr als 30 % ab. Generell liegen die Werte der unterschiedlichen Verkehrsbelastungen bei höheren Kostensätzen näher zusammen und weichen nur noch rund 50 % voneinander ab, während sie sich im Basis-Szenario noch um den Faktor 3 unterscheiden. HOV-Fahrzeuge können über alle Verkehrsmengen und Kostensätze hinweg von der Managed Lane profitieren. Die Reisezeitgewinne fallen dabei umso stärker aus, je größer die potenziellen Reisezeitgewinne sind. Die mindestens erreichten Gewinne liegen zwischen 6 Minuten für die hohe Verkehrsstärke QSV D 120 %, 3 Minuten für 100 % QSV D und lediglich 1 Minute für die mäßige Verkehrsstärke von 80 % QSV D. Während bei der geringen und mittleren Verkehrsstärke die unterschiedlichen Kostensätze keine Rolle spielen, können bei einer Verkehrsstärke von 120 % QSV D durch höhere Kostensätze nochmals 5 Minuten Reisezeitvorteil generiert werden. Ursache hierfür sind die bereits erwähnten größeren Anreize bei höheren Kosten und mit höheren Reisezeitgewinnen auf Fahrgemeinschaften oder den ÖPNV zu wechseln und dadurch freie Kapazitäten oder zumindest geringere Belastungen zu generieren. Davon profitieren auch die Fahrzeuge auf den regulären Fahrstreifen, bei denen die Verläufe der Reisezeiten ähnlich sind.

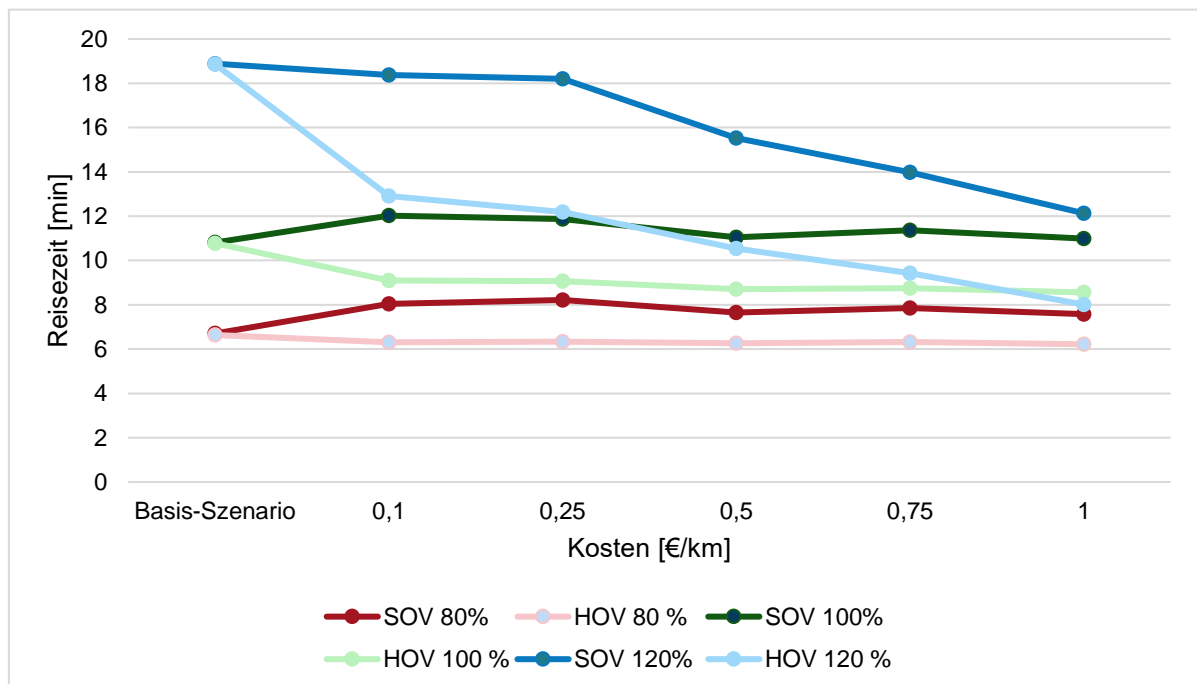


Abbildung 78: Durchschnittliche Reisezeit im Gesamtnetz [min] von SOV und HOV

Betrachtet man nur den Abschnitt zwischen A und B für SOV und HOV im Streckenzug, wie in Abbildung 79, zeigt sich im Vergleich zu Abbildung 78, dass die Auswirkungen einer Managed Lane insbesondere für Verkehrsstärken im Bereich von 100 % QSV D stärker ausgeprägt sind. Insgesamt sind bei allen Verkehrsstärken aufgrund der größeren Streckenlänge die

Reisezeiten länger. Dadurch profitieren speziell Pendler in SOV-Fahrzeugen in den Szenarien mit mittlerer und höherer Verkehrsbelastung von einem verbesserten Verkehrsfluss bei höheren Kosten, während sich bei einer Verkehrsbelastung von 80 % QSV D über die einzelnen Kostenstufen keine nennenswerten Veränderungen ergeben. Der Trend der abnehmenden Reisezeiten bei höheren Verkehrsmengen und hohen Kosten bestätigt sich auch hier. Allerdings liegen hier im Szenario 120 % QSV D die Reisezeiten bis zu einem Kostensatz von rund 0,5 €/km auf einem Niveau mit denen des Basis-Szenarios, erst dann setzt ein spürbarer Rückgang ein, während im Bereich von 0,25 €/km sogar noch ein leichter Anstieg zu verzeichnen ist. Interessant ist, dass die Verläufe der Graphen nicht parallel sind, sondern unterschiedliche Spitzen aufweisen, auch wenn diese nur sehr schwach ausgeprägt sind. Insgesamt reduzieren sich die Abstände auf ein vergleichbares Niveau wie im Gesamtnetz. Bei den Fahrgemeinschaften zeigt sich ein ähnliches Bild. Während die Reisezeiten von HOV für eine Verkehrsbelastung von 80 % QSV D auch im Verhältnis zum Basis-Szenario weitestgehend konstant sind, bieten die Fahrgemeinschaften bei mittlerer oder hoher Verkehrsbelastung deutliche Reisezeitgewinne. Dabei liegen die Reisezeitgewinne für Verkehrsmengen im Bereich 100 % QSV D mit 5 Minuten in einem ähnlichen Bereich wie im Gesamtnetz, während bei einer hohen Verkehrsbelastung von 120 % QSV D deutlich größere Reisezeitgewinne zu erzielen sind.

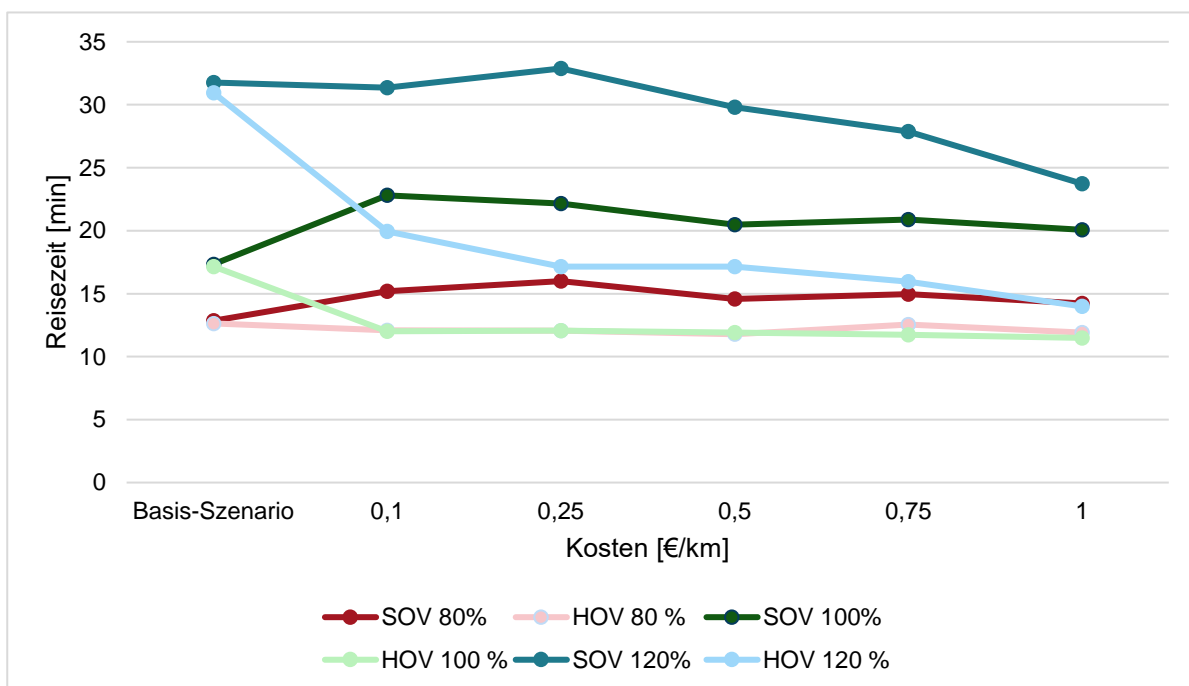


Abbildung 79: Reisezeiten [min] von SOV und HOV für Fahrten A – B

Für kurze Streckenabschnitte, wie von Autobahndreieck 1 nach Anschlussstelle 2, dargestellt in Abbildung 80, sind die Auswirkungen von unterschiedlichen Kosten pro km nicht mehr valide nachweisbar. Im Basis-Szenario zeigen sowohl der reguläre Fahrstreifen als auch die Managed Lane im Fall der hohen Verkehrsbelastung noch deutliche Reisezeitverluste, mit einer mehr als doppelt so langen Fahrtzeit. Für die mittlere und die geringe Verkehrsbelastung

sowie für alle Szenarien mit Managed Lane liegen die Reisezeiten dann innerhalb einer Minute, teilweise sogar nur einiger Sekunden. Die Ergebnisse sind somit extrem anfällig für Schwankungen und es kann nicht mehr von einem gesicherten Reisezeitvorteil der Managed Lane gesprochen werden. Für die Pendler bedeutet das, dass für kurze Strecken, unter 5 km, die Nutzung der Managed Lane keine relevanten Anreize bietet und daher nur in geringem Umfang eine Verkehrsverlagerung zugunsten von Fahrgemeinschaften und dem ÖPNV zu erwarten ist.

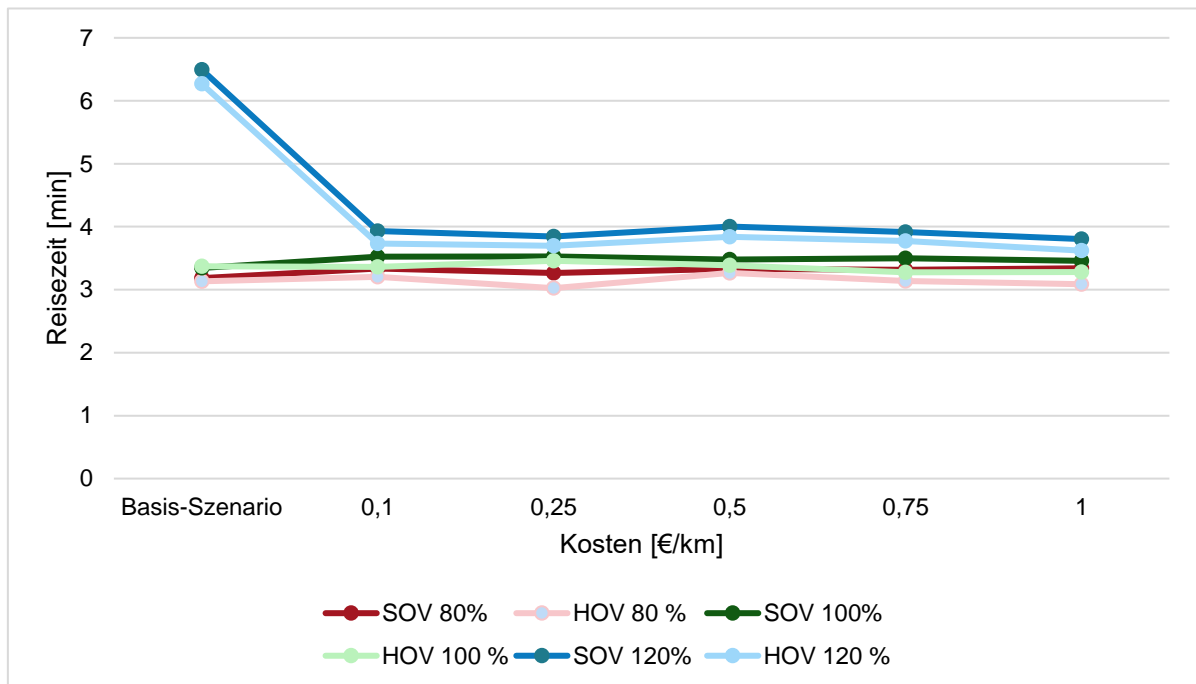


Abbildung 80: Reisezeit [min] von SOV und HOV für Fahrten 1 - 2

4.5.2 Modal Split

In den Auswertungen der einzelnen Szenarien in Kapitel 4.4 wurden bereits die Anteile des Modal Splits für die unterschiedlichen Szenarien untersucht. In den jeweiligen Basis-Szenarien, in denen noch keine Managed Lane implementiert ist, ist der durchschnittliche Modal Split im Gesamtnetz bei niedriger und mittlerer Verkehrsstärke gleich und verteilt sich zu 70 % auf Alleinfahrer im PKW, 10 % Fahrgemeinschaften und 20 % ÖPNV. Kommt es zu einer höheren Verkehrsbelastung und damit einhergehend zu höheren Reisezeiten, verlagert sich der Verkehr teilweise auf den ÖPNV, so dass sich ein Anteil von 58 % PKW in Alleinnutzung, 8 % Fahrgemeinschaften und 34 % ÖPNV ergibt. Bereits hier zeigt sich, dass Reisezeitvorteile ein zentraler Anreiz für den Wechsel des Verkehrsmittels sind.

Um einen Überblick über die Entwicklung des Modal Split zu erhalten, zeigt Abbildung 81 die Entwicklung des Modal Splits für Fahrten von Autobahndreieck 1 nach Autobahndreieck 6 über alle Szenarien hinweg. In der Abbildung sind für die Verkehrsträger Alleinfahrer auf den regulären Fahrstreifen (SOV), Fahrgemeinschaften (HOV), bezahlende Alleinfahrer auf der

Managed Lane (HOT) sowie den Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) für niedrige (80 %), mittlere (100 %) und hohe (120 %) Verkehrsbelastungen über die unterschiedlichen Kostenszenarien (0,1 €/km – 1 €/km) ihre jeweiligen Anteile am Modal Split aufgetragen. Bei der Auswertung zeigt sich sehr deutlich, dass die Anteile an SOV weitestgehend unabhängig von den Kosten der Managed Lane sind. Lediglich bei hohen Verkehrszahlen gibt es kleine Schwankungen, die insgesamt jedoch auch untergeordnet sind. Es gibt somit in jedem Szenario zur Verkehrsstärke eine konstante Menge an SOV-Fahrzeugen, die Verschiebungen im Modal Split finden hingegen vorwiegend zwischen den Nutzern der Managed Lane und dem ÖPNV statt. Hier zeigt sich ein regelmäßiges Schema, dass der Anteil der HOT-Fahrzeuge mit steigenden Kosten abnimmt, während HOV-Fahrzeuge und der ÖPNV von höheren Streckennutzungsgebühren profitieren können. Generell gesehen nehmen die Anteile von SOV bei höherer Verkehrsbelastung ab, während die Anteile der anderen Verkehrsträger tendenziell zulegen können. Lediglich bei hoher Verkehrsbelastung und hohen Reisezeitgewinnen schafft es der ÖPNV auf ähnliche Anteile im Modal Split zu kommen wie die SOV, die sonst den Modal Split dominieren. Hier zeigt sich erneut, dass es vorwiegend die Reisezeitvorteile sind, die als Anreiz zum Wechsel des Verkehrsträgers dienen. Wer sich einmal gegen die Nutzung der regulären Fahrstreifen entschieden hat, wird mit hoher Wahrscheinlichkeit auch bei hohen Nutzungsgebühren nicht zurückwechseln, sondern eher von HOT auf ÖPNV oder HOV wechseln. Zudem wird deutlich, dass Managed Lanes ihr volles Potenzial primär bei hohen Verkehrsstärken ausspielen können.

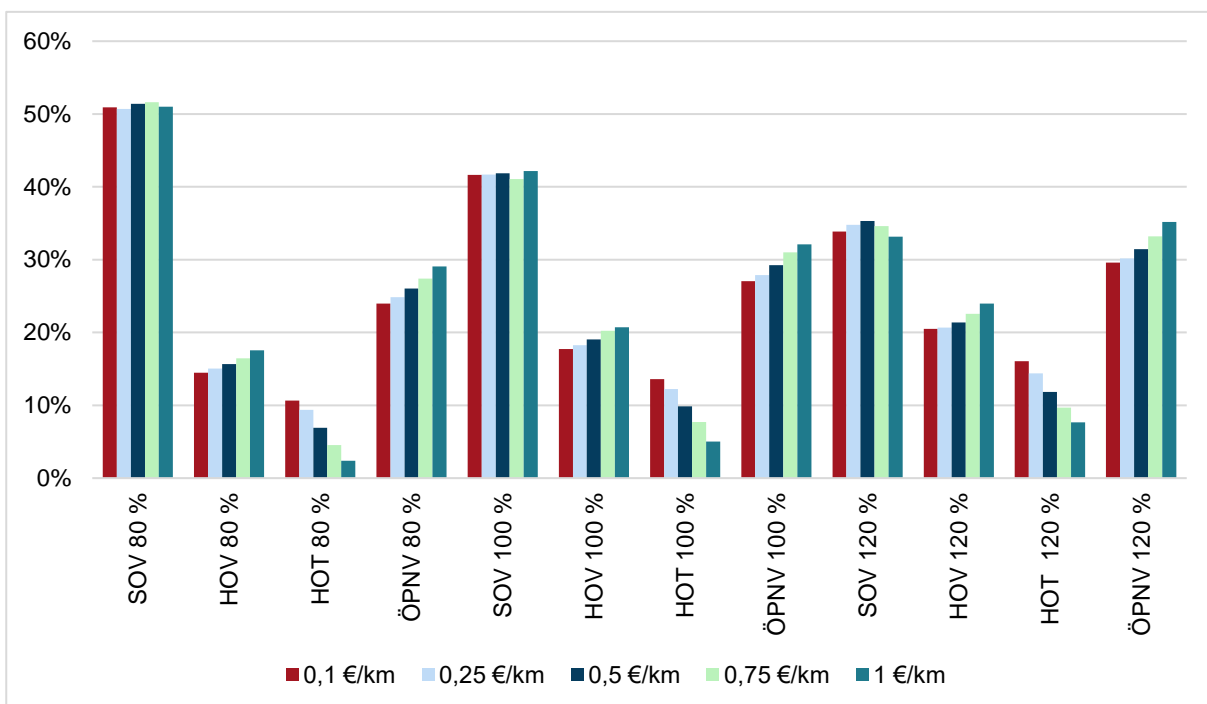


Abbildung 81: Überblick Entwicklung Modal Split für Fahrten von AD 1 nach AD 6

Betrachtet man in Abbildung 82 den Modal Split über das Gesamtnetz für die unterschiedlichen Szenarien, so sind die grundsätzlichen Ergebnisse zunächst vergleichbar mit denen aus Abbildung 81, das einen längeren Streckenabschnitt beinhaltet. Generell liegen die Werte der

SOV im Gesamtnetz über denen des langen Streckenabschnitts, während insbesondere der ÖPNV etwas unattraktiver ist. Bei den Fahrzeugen der Managed Lane ist der Anteil der HOT-Anteil auf etwa dem gleichen Niveau. Er liegt teilweise im Gesamtnetz sogar über dem langen Streckenabschnitt, während Fahrgemeinschaften spürbar Anteile abgeben müssen. Die Abstände zwischen den unterschiedlichen Szenarien sind im Gesamtnetz deutlich weniger stark ausgeprägt als im langen Streckenabschnitt. Sind im Abschnitt zwischen AD 1 und AD 6 noch Abweichungen von 10 % und mehr vorhanden, sinken diese auf maximal 5 % im Gesamtnetz. Dies ist unter anderem in der dämpfenden Wirkung kürzerer Streckenabschnitte begründet. Insgesamt bleibt aber auch hier zu beobachten, dass Managed Lanes speziell bei hohen Verkehrsbelastungen wirksam werden, die Einflüsse mit kürzerer Streckenlänge aber erheblich abnehmen. Ohne eine ausreichende Streckenlänge können die Managed Lanes somit nicht ihr Potenzial entfalten, was als Ergebnis festzuhalten ist.

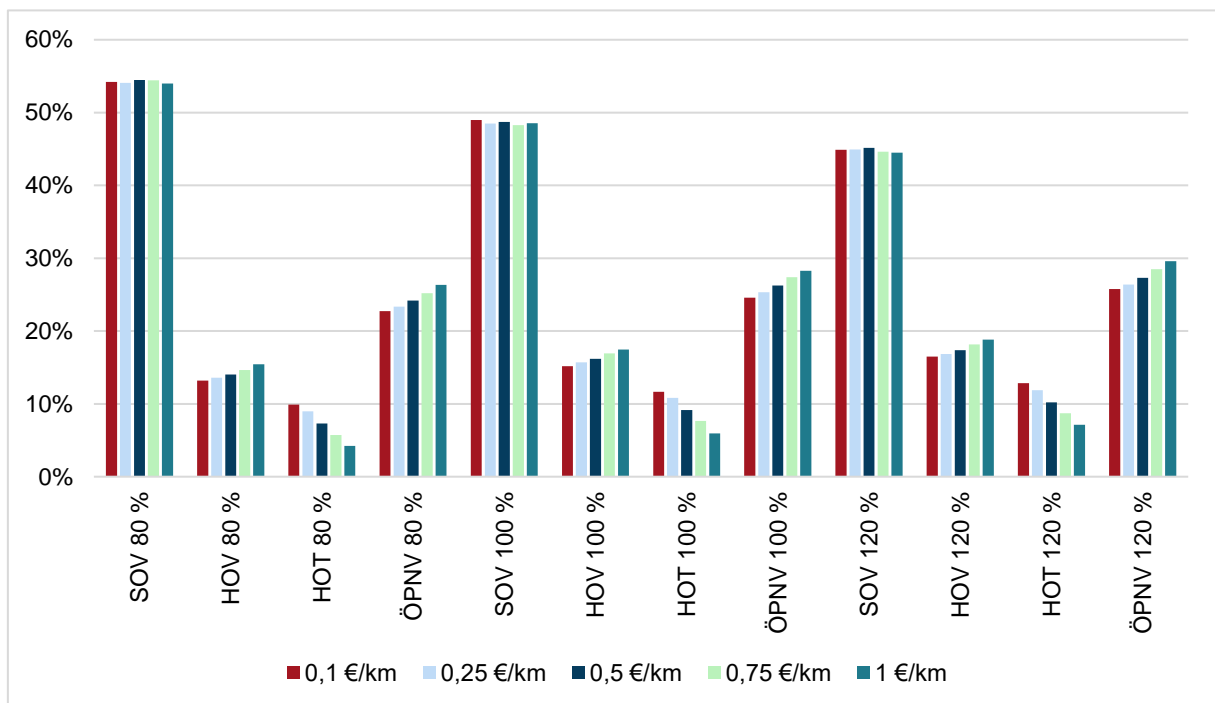


Abbildung 82: Modal Split Gesamtnetz

Wie groß der Einfluss der Wirklänge der Managed Lane auf deren Wirksamkeit ist, zeigt Abbildung 83, der das kurze Streckenstück zwischen Autobahndreieck 1 und Anschlussstelle 2 betrachtet. Sowohl die Verkehrsbelastung als auch die Kosten für die Managed Lane haben keinen relevanten Einfluss mehr auf die Verkehrsmittelwahl. Erwartungsgemäß liegt der Anteil der Alleinfahrer auf den regulären Fahrstreifen höher als bei längeren Streckenabschnitten, beinahe 2 von 3 Pendlern nehmen auf diesem Streckenabschnitt den PKW. Rund jeder zehnte Pendler würde eine Fahrgemeinschaft eingehen, während jeder fünfte sich für den ÖPNV entscheiden würde. Die Anzahl derer, die für die Nutzung der Managed Lane Geld bezahlen würden, liegt konstant im Bereich von 7 %. Die Tatsache, dass auf kurzen Strecken kein Einfluss von Kosten oder der Verkehrsstärke vorliegt, zeigt deutlich, dass die Wirksamkeit einer Managed Lane sehr stark von ihrer Wirklänge abhängt. Dass sich der Modal Split im

Vergleich zum Basis-Szenario um ca. 10 % zu Lasten der SOV verschiebt, liegt vorwiegend daran, dass der Anteil der HOT-Teilnehmer zuvor in den SOV enthalten war. Durch die zusätzliche Option in der Verkehrsmittelwahl wählt eine begrenzte Anzahl an Pendlern die alternative Route über die Managed Lane.

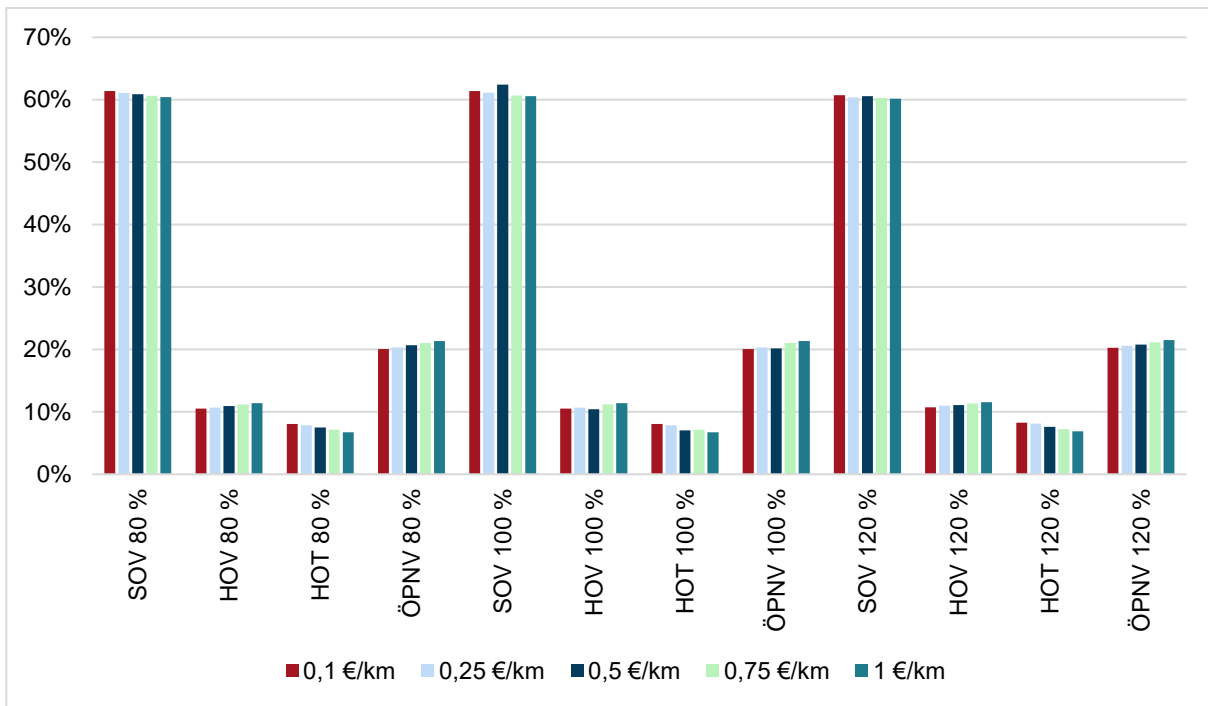


Abbildung 83: Modal Split von AD 1 nach AS 2

4.5.3 Kostensensitivität

Wie in den Kapiteln 3.3.2, 4.5.1 und 4.5.2 bereits angedeutet, ist der Einfluss der Kosten der Managed Lane auf die Verkehrsmittelwahl eine der beiden zentralen Einflussgrößen, tritt jedoch insgesamt etwas hinter die Einflussstärke der Reisezeitgewinne zurück. Zudem ist die Bereitschaft für die Nutzung einer Managed Lane stark von den potenziellen Reisezeitgewinnen abhängig.

In Abbildung 84 wird anschaulich, welchen Einfluss die Kosten auf die Verkehrsmittelwahl haben. Hierzu wurde für die unterschiedlichen Verkehrsbelastungen über die unterschiedlichen Kostenszenarien, aber konstanten Reisezeitgewinnen untersucht, wie sich der Modal Split verhält. Betrachtet wurden der Streckenabschnitt von Autobahndreieck 1 nach Autobahndreieck 6. Im Ergebnis zeigt sich deutlich, dass über alle Verkehrsbelastungen hinweg der Anteil von Alleinfahrern sowohl als SOV auf den regulären Fahrstreifen, als auch als HOT auf der Managed Lane mit steigenden Kosten abnimmt. Die Verlagerung erfolgt hin zu Fahrgemeinschaften und dem ÖPNV. Die Verlagerung hat verschiedene Ursachen. Zunächst wird die Managed Lane bei höheren Kosten unattraktiver, wodurch freie Kapazitäten auf der Managed Lane und damit ein besserer Verkehrsfluss entsteht. Dem vorliegenden Modell liegt die Annahme zugrunde, dass der ÖPNV nicht langsamer ist als der Verkehr auf

der Managed Lane. Damit steigt mit jeder Attraktivitätssteigerung der Managed Lane auch die Attraktivität des ÖPNVs. Das Verlagerungspotenzial der SOV liegt bei rund 5 %, das der HOT bei rund 7 %. Damit bleiben die SOV das überwiegend dominierende Verkehrsmittel, auch wenn Potenziale zur Verlagerung vorhanden sind.

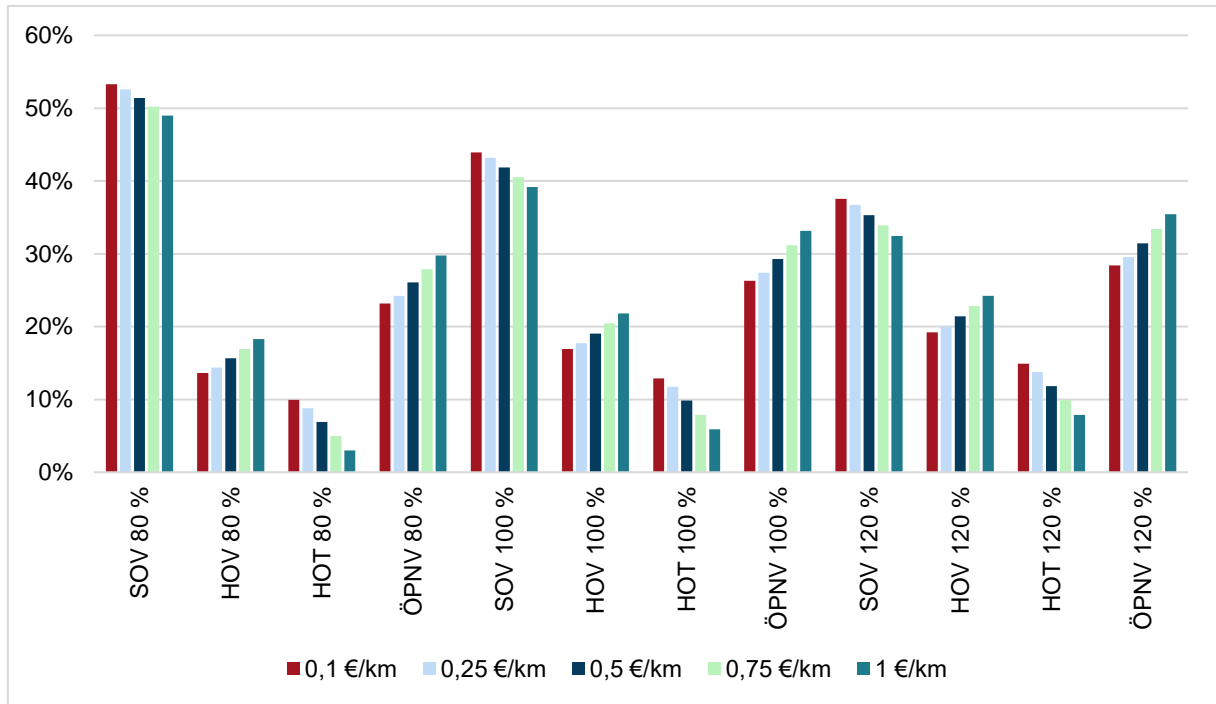


Abbildung 84: Überblick Kostensensitivität AD 1 nach AD 6

In Abbildung 85 wird die Kostensensitivität der Pendler im Gesamtnetz dargestellt. Im Vergleich zu Abbildung 84 zeigen sich die prozentualen Anteile zwar verschoben, die generellen Aussagen bleiben aber bestehen. Je höher die Kosten pro km sind, desto größer sind die Anreize von ÖPNV und Fahrgemeinschaften und damit auch ihre Anteile am Modal Split. Demgegenüber werden Alleinfahrten auf regulären Fahrstreifen und Alleinfahrten auf der Managed Lane unattraktiver und geben Anteile am Modal Split ab. Durch die dämpfende Wirkung der kürzeren Streckenabschnitte verringern sich teilweise die Abstände zwischen den minimalen und maximalen Werten. Insgesamt bleibt der SOV aber das dominante Verkehrsmittel, insbesondere bei durchschnittlichen und niedrigen Verkehrsstärken wird dieser Trend sogar verstärkt.

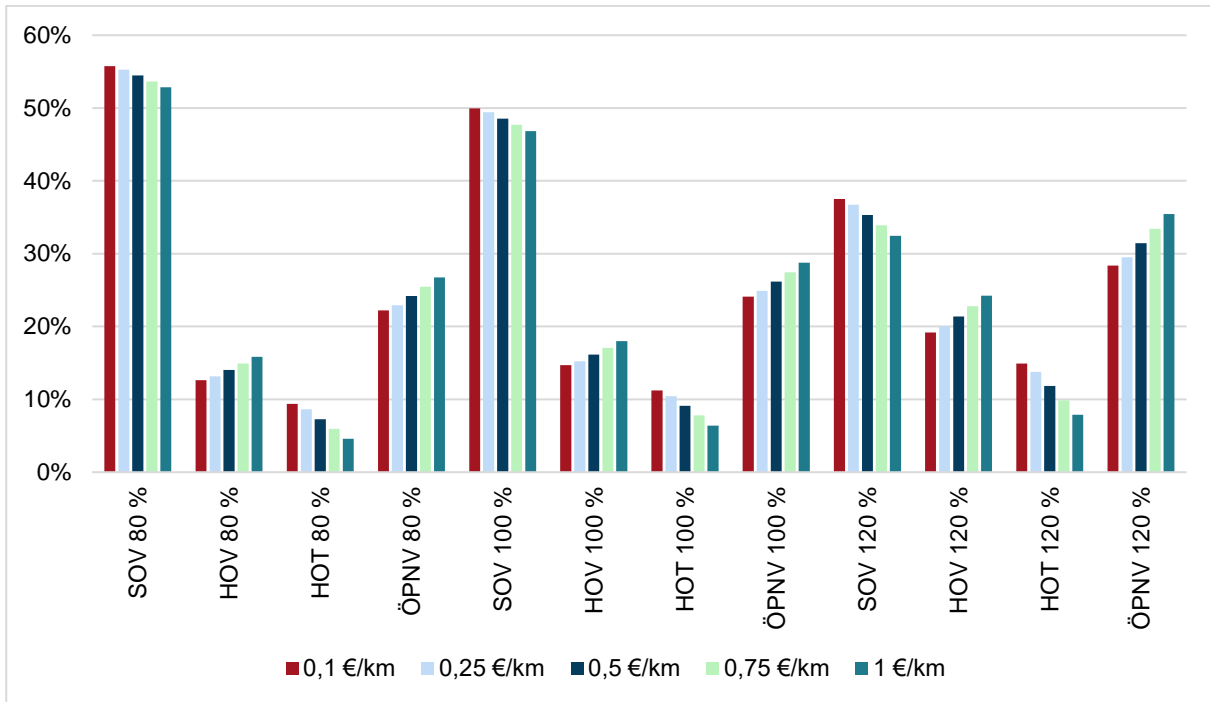


Abbildung 85: Kostensensitivität Gesamtnetz

Die geringe Wirksamkeit von Managed Lanes auf kurzen Strecken zeigt sich auch in Abbildung 86, die erneut den Abschnitt zwischen Autobahndreieck 1 und Anschlussstelle 2 darstellt. Die Abbildung zeigt deutlich, dass weder die Verkehrsbelastung noch die Kosten relevante Auswirkungen auf den Modal Split haben. Der eigene PKW ist auf kurzen Streckenabschnitten, auf Schnellstraßen das flexibelste Verkehrsmittel und dominiert in allen Szenarien. Auch die Zahl der HOT-Nutzer ist auf verhältnismäßig hohem Niveau konstant. Die Zahlen entsprechen insgesamt denen des Modal Split im Basis-Szenario der niedrigen und mittleren Verkehrsbelastung, wenn noch keine Managed Lane implementiert wurde. Somit hat die Managed Lane hier keine Auswirkung auf die Verkehrsmittelwahl und wirkt bei hohen Verkehrsbelastungen zu Lasten von Fahrgemeinschaften und dem ÖPNV. Die Ursachen hierfür sollten erneut in der begrenzten Wirksamkeit einer kurzen Managed Lane liegen.

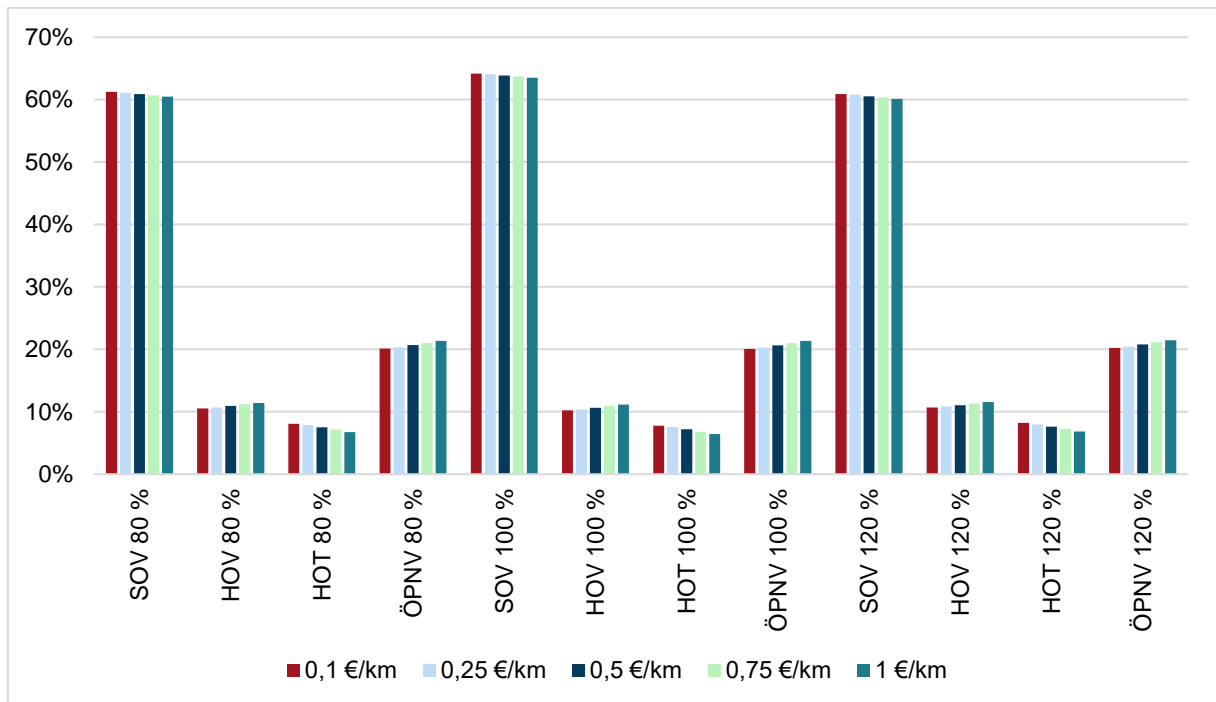


Abbildung 86: Kostensensitivität AD 1 nach AS 2

Grundsätzlich relevant für die Thematik Kostensensitivität bei Managed Lanes wäre auch eine Betrachtung der Auswirkungen auf unterschiedliche Einkommensgruppen und soziale Gruppen. Leider geben die aktuellen Daten und auch die vorliegenden Formeln zur Generierung der Nachfrage hier keine zuverlässige Antwort. Hier wäre in weiteren Arbeiten unterschiedlicher Wissenschaftsbereiche Potenzial für tiefergehende Untersuchungen. Daran knüpfen sich auch Fragen zu einer sozial gerechten Preisgestaltung oder sogar übergeordnet einer sozial gerechten Mobilität. Als mögliches Best Practice Beispiel kann hier die Kvisch 1 in Israel herangezogen werden (Deighton-Smith et al. 2020; Galit Cohen-Blankshtain et al. 2020).

4.6 Fundamentaldiagramme der Szenarien

Fundamentaldiagramme sind in der Verkehrstechnik ein zentrales Werkzeug zur leichteren Visualisierung der Abhängigkeiten von Verkehrsdichte, Verkehrsfluss und Geschwindigkeit. Sie bieten eine verhältnismäßig einfache Möglichkeit, um die grundlegenden Ergebnisse von Simulationen oder realen Verkehrszuständen sichtbar zu machen.

4.6.1 Übersicht Fundamentaldiagramme

Das Fundamentaldiagramm ist ein Standardverfahren der Verkehrstechnik zur Beschreibung der Verkehrszustände frei fließender Verkehr, gebundener Verkehr und Stau. Hierzu werden die drei Kenngrößen Verkehrsstärke k , Verkehrsdichte q und Geschwindigkeit v an einem

Querschnitt herangezogen. Die Kenngrößen werden durch die sogenannte Fundamentalbeziehung

$$q = v * k \tag{30}$$

miteinander verknüpft. Das Fundamentaldiagramm stellt grundsätzlich eine dreidimensionale Punktwolke dar, die in der Praxis häufig auf drei Diagramme in zweidimensionaler Form, aufgeteilt werden. (Treiber und Kesting 2010)

Die Ursprünge der Fundamentaldiagramme reichen bis in die 1930er-Jahre zurück und wurden von Greenshields begründet (Greenshields et al. 1934; Greenshields et al. 1935). Das Verfahren wurde seitdem regelmäßig angewendet und weiterentwickelt. In Deutschland bietet die FGSV mit der W1 Veröffentlichung „Hinweise zum Fundamentaldiagramm - Grundlagen und Anwendungen“ (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2005) einen guten Überblick zum aktuellen Stand. Hier werden in der Folge nur die wichtigsten Merkmale zusammengefasst und für tiefere Informationen auf die Literatur verwiesen.

Die drei Teildiagramme des Fundamentaldiagramms sind das q-v-Diagramm, das q-k-Diagramm und das k-v-Diagramm und werden in Abbildung 87 dargestellt.

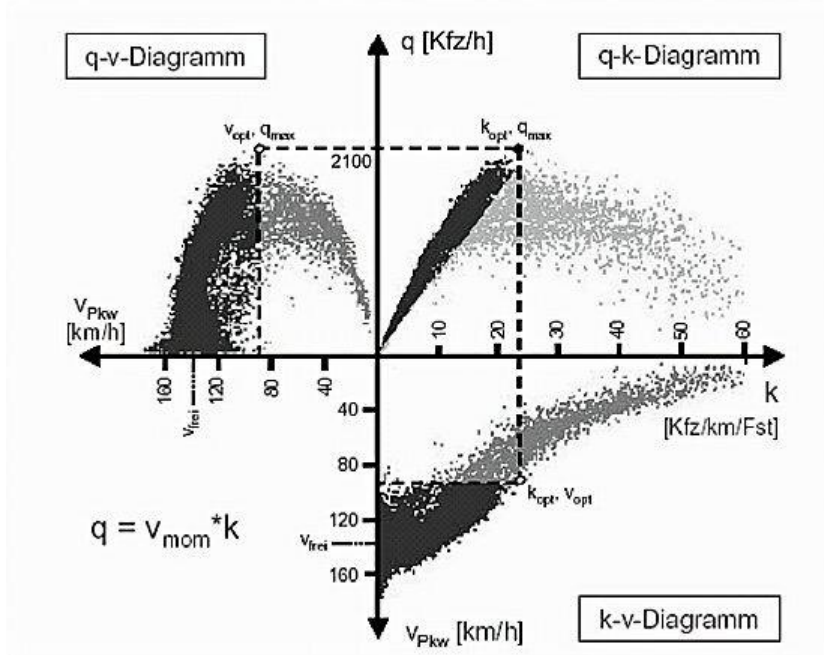


Abbildung 87: Darstellungsformen des Fundamentaldiagramms in 2D (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2005)

In der Praxis zeigt sich, dass vor allem das q-v-Diagramm und das k-v-Diagramm zur Anwendung kommen. Diese werden daher im Folgenden nochmals genauer betrachtet. Der am häufigsten verwendete Zusammenhang im Fundamentaldiagramm, ist das q-v-Diagramm, das noch einmal genauer in Abbildung 88 dargestellt ist. Es ist vielfach die Grundlage für die Dimensionierung von Straßen und ist beispielsweise auch Grundlage des HBS 2015. Das q-v-Diagramm ist bei überlasteten Streckenabschnitten parabelförmig, wobei der obere Ast den

freien, stabilen Verkehr beschreibt, während der untere Ast den zusammengebrochenen und instabilen Verkehrsfluss beschreibt. Im Scheitelpunkt der Parabel liegt der Bereich der maximalen Verkehrsstärke, die sich durch eine kapazitätsmäßig optimale Geschwindigkeit erreichen lässt. Bei allen Werten abseits des Scheitelpunktes werden jedem Wert der Verkehrsstärke zwei Geschwindigkeitswerte zugewiesen. Dies stellt in der Praxis ein gewisses Risiko zur Fehlinterpretation dar, so dass hier immer das komplette Diagramm erarbeitet und untersucht werden muss. (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2005; Wu 2000)

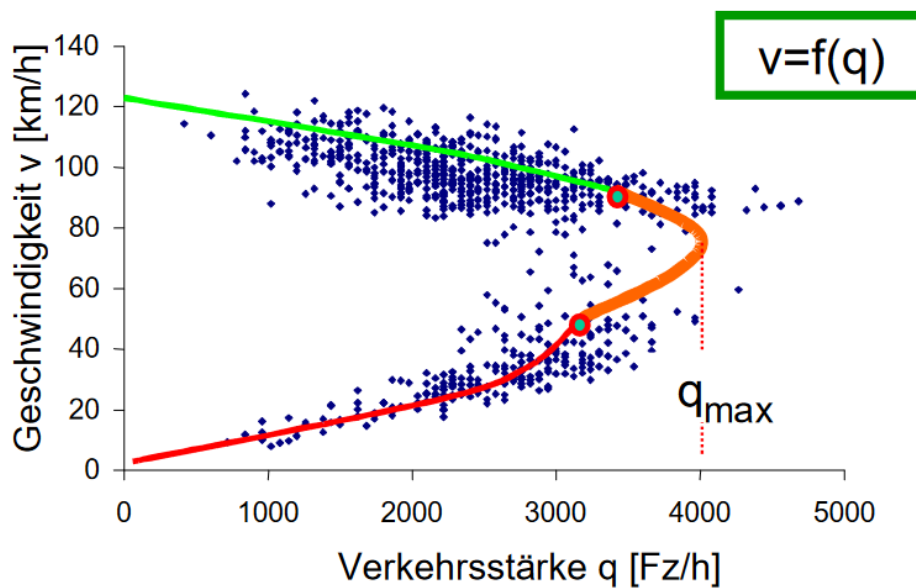


Abbildung 88: Allgemeines q-v-Diagramm (Wu 2000)

Für die Bewertung des Verkehrsflusses ist das k-v-Diagramm von besonderer Bedeutung. Im Optimalfall bildet der Graph eine S-Form, wie sie in Abbildung 89 zu erkennen ist. Im oberen Bereich der Kurve ist der Verkehr noch frei fließend und ungestört. Der Übergang mit der größten Steigung beschreibt den sogenannten „capacity drop“, einem Abfall der Kapazität. In der Praxis ist dieser Übergang häufig nicht klar zu erkennen und es kommt zu einem Zusammenwachsen der Bereiche mit freiem und gestörtem Verkehrsfluss. Dies erschwert die Auswertung. Gleichzeitig hat das k-v-Diagramm den Vorteil, dass es jeweils nur eine Paar-Beziehung an Werten gibt und keinem x-Wert mehrere y-Werte zugeordnet werden. In der Regel kann die Abnahme der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsdichte gut linear beschrieben werden. (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2005; Wu 2000)

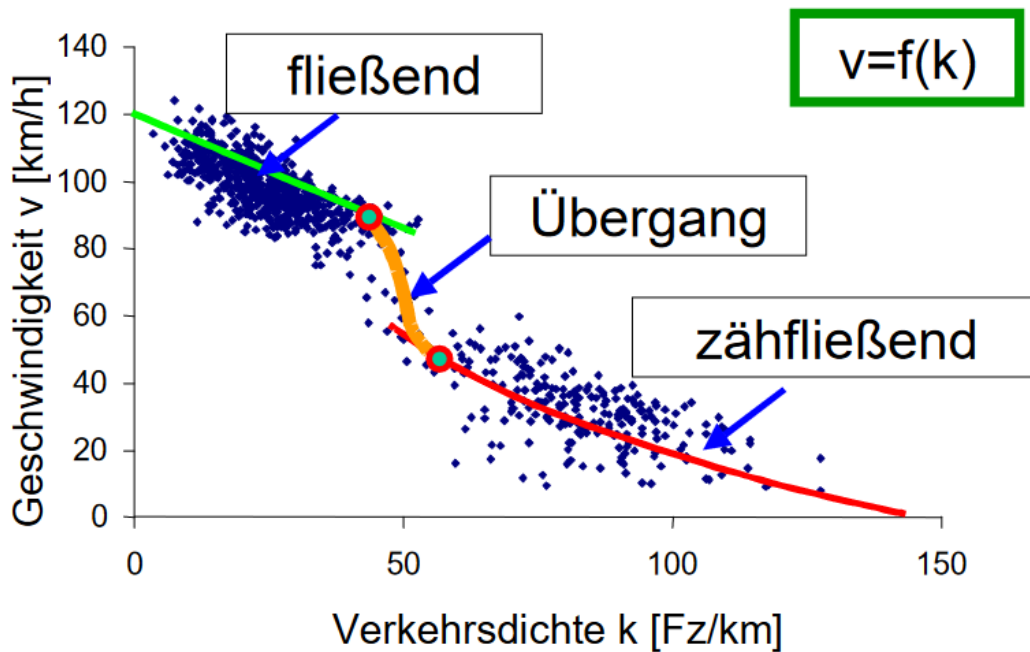


Abbildung 89: Allgemeines k-v-Diagramm (Wu 2000)

Die generellen Verkehrszustände sind nach dem Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen – MARZ 2018 (BASt 2018).

4.6.2 Datenerfassung im synthetischen Netz

Die notwendigen Daten der Fundamentaldiagramme wurden an je einem Querschnitt in Sektor 2, zwischen AD 1 und AS 2 und einem Querschnitt in Sektor 6, zwischen AS 5 und AD 6 gewonnen. Die Lage der Detektoren ist in Abbildung 90 in Rot eingetragen. Die Detektoren erfassen die Daten im 30-Sekunden-Takt. Um die Entwicklung des Verkehrsflusses zeigen zu können, erfolgt die Auswertung über einen Zeitraum von 180 Minuten. Der Zufluss ist über die Zeit konstant, eine Anfangsbelastung des Netzes wurde nicht implementiert.

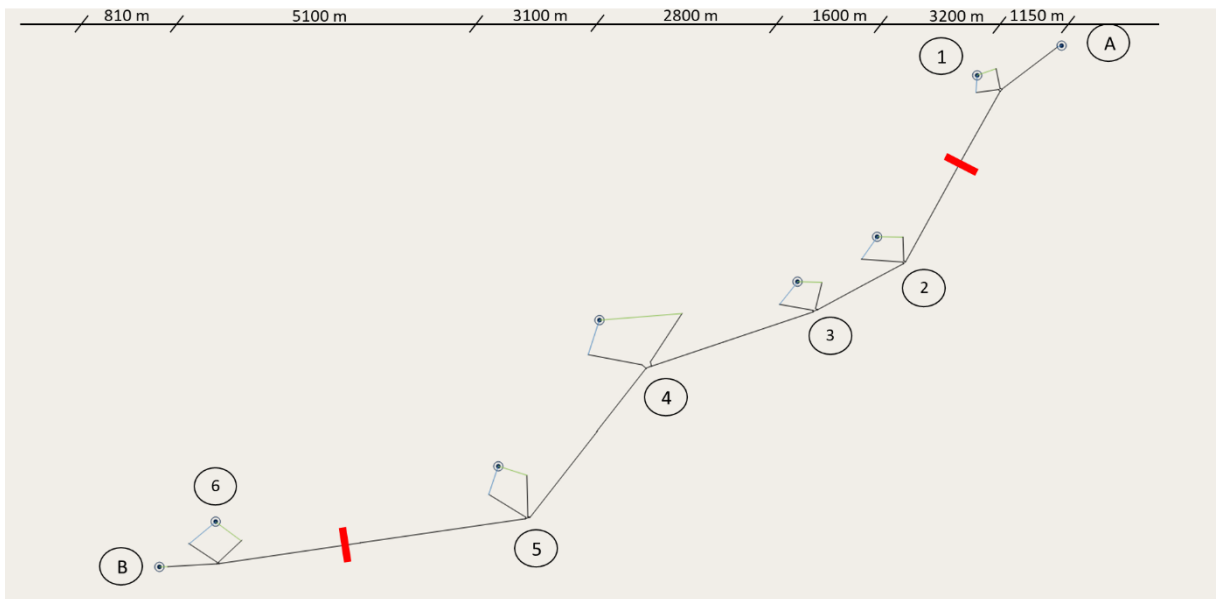


Abbildung 90: Detektorstandorte für Fundamentaldiagramme

Die Anordnung der Detektoren erfolgt in beiden Sektoren, wie in Abbildung 91 dargestellt. Mittels eines großen Detektors werden zunächst die Durchschnittswerte ermittelt. Unmittelbar stromabwärts schließen drei Einzeldetektoren an, die die Fahrstreifen einzeln erfassen. Zur besseren Darstellung sind die Einzeldetektoren in Abbildung 91 leicht versetzt angeordnet, tatsächlich befinden sie sich auf gleicher Höhe.

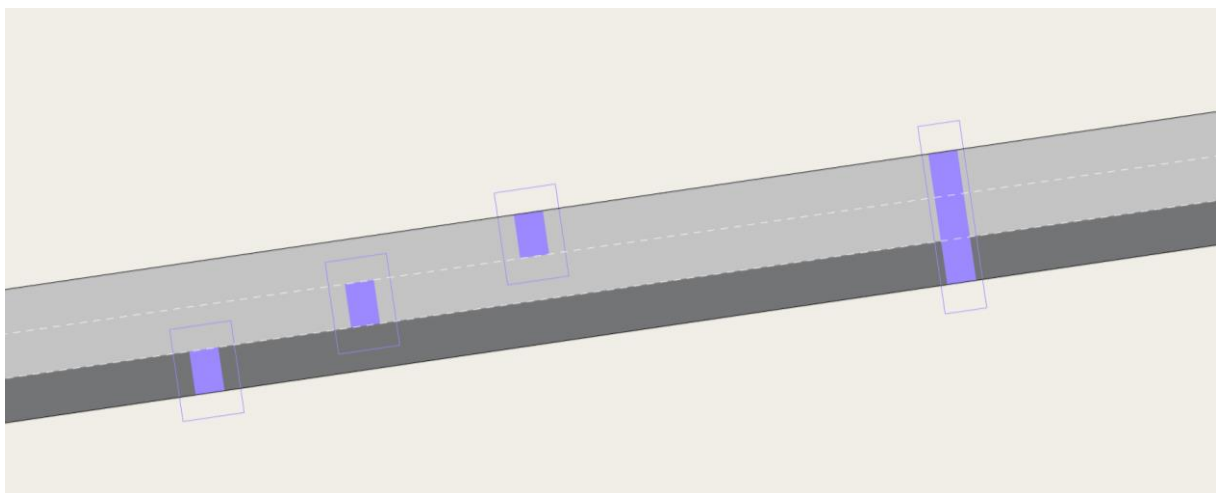


Abbildung 91: Anordnung der Detektoren

4.6.3 Ergebnisse der Fundamentaldiagramme

Verkehrsstärke 80 % QSV D

Wie bereits die vorangegangenen Auswertungen gezeigt haben, wird die Kapazität der Strecke bei einer niedrigen Verkehrsstärke von 80 % der Verkehrsstärke der QSV D nicht voll ausgeschöpft. Dies spiegelt sich auch in den Fundamentaldiagrammen wider. Beispielhaft sind

in Abbildung 92 für Sektor 2 bei einem Kostensatz von 0,1 €/km die q-v-Diagramme für die Managed Lane sowie den Gesamtquerschnitt mit allen 3 Fahrstreifen angegeben. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Managed Lane einen weitestgehend freien Verkehrsfluss hat. Die Fahrzeuge fahren überwiegend in ihrer Wunschgeschwindigkeit, erst bei höheren Verkehrsstärken ist ein Übergang in den gebundenen Verkehr zu erkennen. Allerdings wird der Scheitelpunkt bislang nicht erreicht. Über den gesamten Querschnitt betrachtet ist der Verkehr deutlich gebunden, der Verkehr läuft aber noch flüssig. Alle Fahrzeuge erreichen eine Geschwindigkeit von 80 km/h oder mehr. Auch hier wird der Scheitelpunkt und damit die maximal mögliche Verkehrsstärke nicht erreicht.

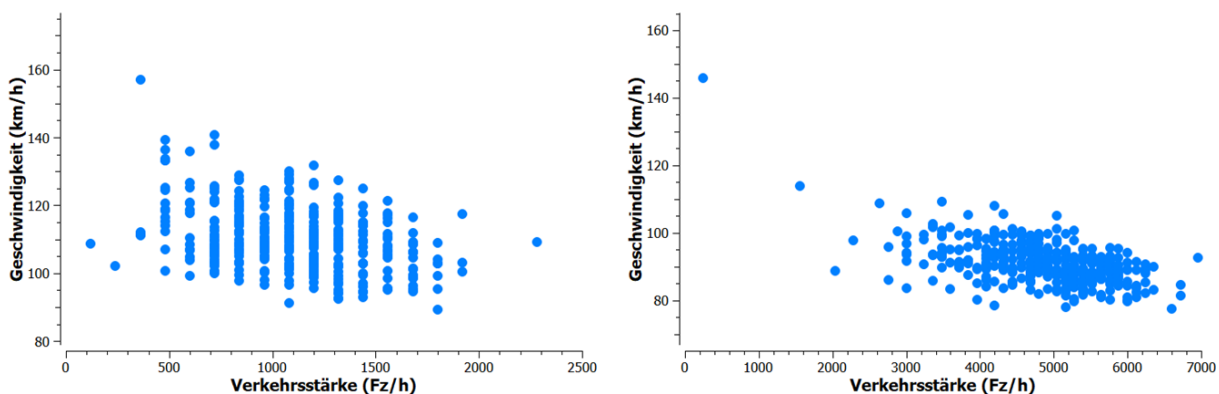


Abbildung 92: q-v-Diagramme für die Managed Lane (l) und den gesamten Querschnitt (r) bei QSV D 80 % in Sektor 2 bei 0,1 €/km

In Sektor 6, der in Abbildung 93 zu sehen ist, ist die Verkehrsstärke höher als in Sektor 2, was sichtbare Auswirkungen auf den Verkehrsfluss hat. Die Managed Lane auf der linken Seite fließt noch immer weitestgehend frei, auch wenn sich ab etwa 1.500 Fz/h deutliche Zeichen eines gebundenen Verkehrs zeigen. Über den gesamten Querschnitt zeigt die Punktwolke aber die typische Parabelform hin zu zäh fließendem Verkehr und Stau.

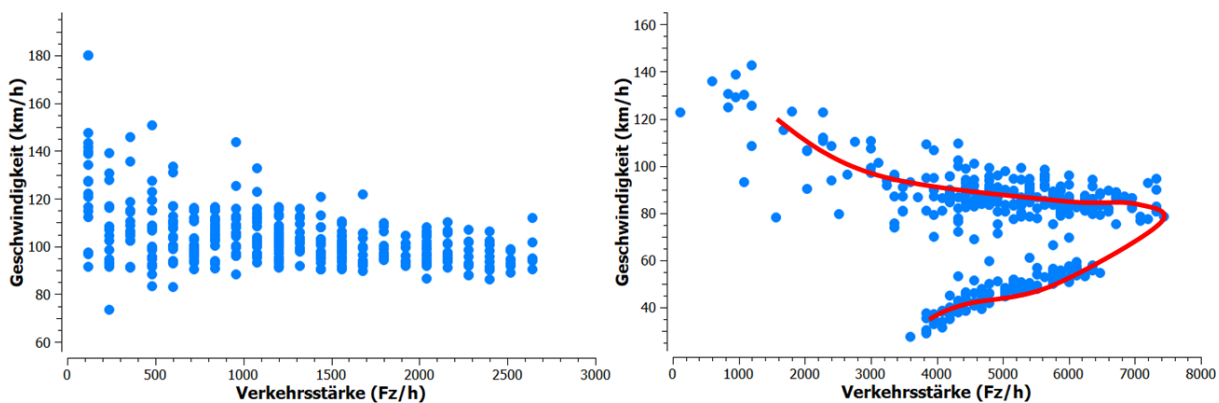


Abbildung 93: q-v-Diagramme für die Managed Lane (l) und den gesamten Querschnitt (r) bei QSV D 80 % in Sektor 6 bei 0,1 €/km

Im k-v-Diagramm für den 1. Fahrstreifen in Sektor 6 bei Kosten von 0,1 €/km sind in der Punktwolke deutlich die Bereiche für freifließenden und zäh fließenden Verkehr erkennbar. Dieser entsteht, wenn die Strecke mit der die Zeit überlastet.

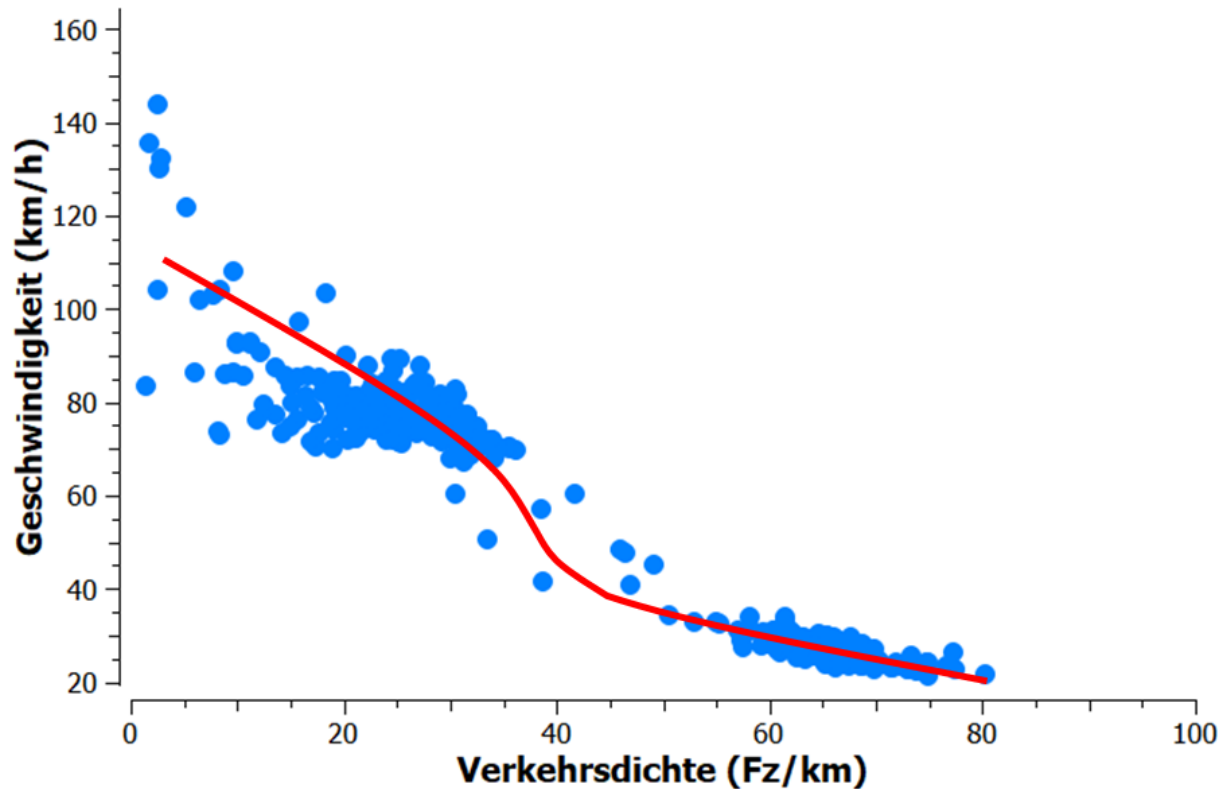


Abbildung 94: k-v-Diagramm für Fahrstreifen 1 bei QSV D 80 % in Sektor 6 bei 0,1 €/km

Die Diagramme für die weiteren Kostenszenarien sehen sehr ähnlich zu den hier vorgestellten aus, mit den Ergebnissen, dass im Sektor 2 noch keine Überlastung vorliegt, die dann in Sektor 6 auftritt. Daher wird hier auf die Darstellung weiterer Diagramme verzichtet.

Verkehrsstärke 100 % QSV D

Die QSV D stellt die perspektivische Zielgröße auf deutschen Fernstraßen dar. Angesichts dessen ist diese Verkehrsbelastung daher von besonderem Interesse.

Die Fundamentaldiagramme zeigen, dass sich in Sektor 2 auch bei einer durchschnittlichen Verkehrsbelastung noch keine Überlastung einstellt. Beispielhaft sind in Abbildung 95 für einen Kostensatz von 0,5 €/km im Sektor 2 die q-v-Diagramme für die Managed Lane sowie den Gesamtquerschnitt dargestellt. Die Fundamentaldiagramme der anderen Kostensätze sehen ähnlich aus. Auf der Managed Lane (linke Abbildung) ist durch die Punktwolke erkennbar, dass die meisten Fahrzeuge mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahren können. Die Punktwolke des gesamten Querschnitts (rechts) ist deutlich kompakter, was auf gebundenen Verkehr hindeutet, der es verhindert, die individuelle Wunschgeschwindigkeit zu fahren. Allerdings liegt

die Geschwindigkeit bei der überwiegenden Anzahl der Messpunkte bei 80 km/h oder darüber. Der Verkehr fließt also noch mit einer hohen Geschwindigkeit und ist nicht gebremst.

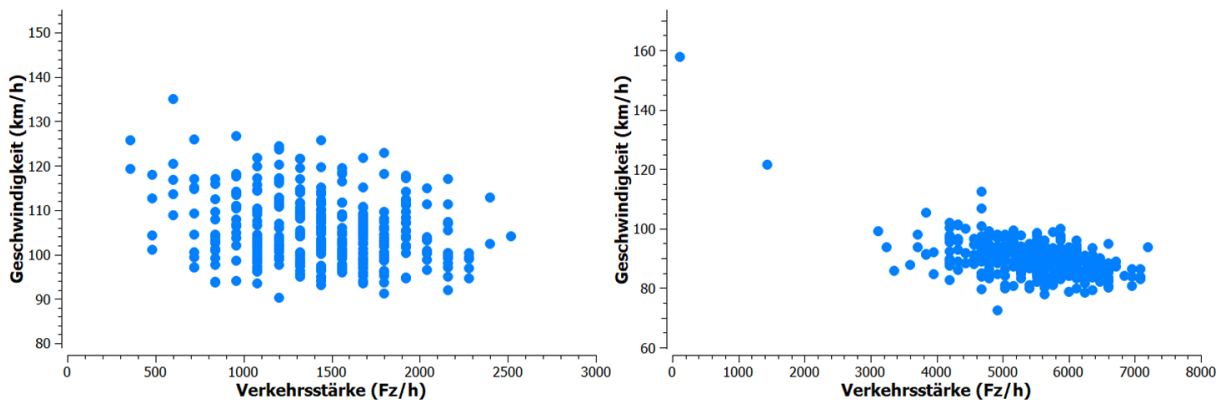


Abbildung 95: q-v-Diagramme für die Managed Lane (l) und den gesamten Querschnitt (r) bei QSV D 100 % in Sektor 2 bei 0,5 €/km

Auch im Sektor 6 bei einem Kostensatz von 0,5 €/km ähneln die Fundamentaldiagramme denen der geringen Verkehrsbelastung bei 0,1 €/km. Die Managed Lane auf der linken Seite in Abbildung 96 zeigt weiterhin einen teilweise gebundenen, teilweise freien Verkehrsfluss, der die maximal mögliche Verkehrsstärke bislang nicht überschritten hat und mit Geschwindigkeiten von über 80 km/h einen guten Verkehrsfluss aufweist. In der rechten Abbildung, die das Fundamentaldiagramm über den kompletten Querschnitt zeigt, bildet die Punktwolke die Form einer Parabel, es sind also alle Verkehrszustände, vom freien Verkehrsfluss bis zum gestauten Verkehr enthalten.

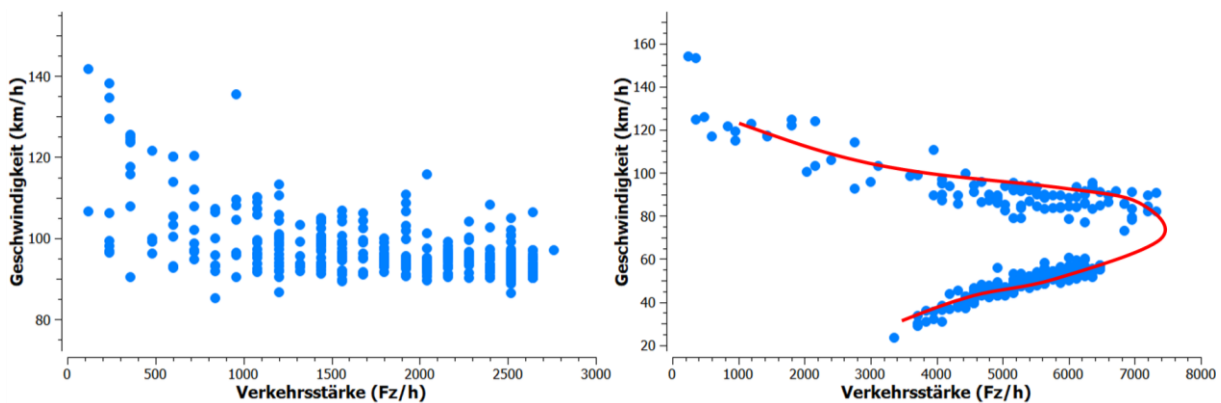


Abbildung 96: q-v-Diagramme für die Managed Lane (l) und den gesamten Querschnitt (r) bei QSV D 100 % in Sektor 6 bei 0,5 €/km

Bei einer Verkehrsbelastung von 100 % QSV D treten in Sektor 6 erstmals nennenswerte Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Kostenszenarien auf, wie Abbildung 97 zeigt. Auf der Managed Lane kommt es bei sehr geringen Kosten von 0,1 €/km zu einer Überlastung, die sich durch das Überschreiten des Scheitelpunktes der Parabel zeigt. Da die Geschwindigkeit bisher nicht unter die Marke von 50 km/h fällt, ist der Verkehr aber nur als

zäh fließend und bislang nicht stockend einzuordnen. Für die Kostenszenarien 0,5 €/km und 1 €/km bleibt der Verkehr im freien, bzw. gebundenen Bereich.

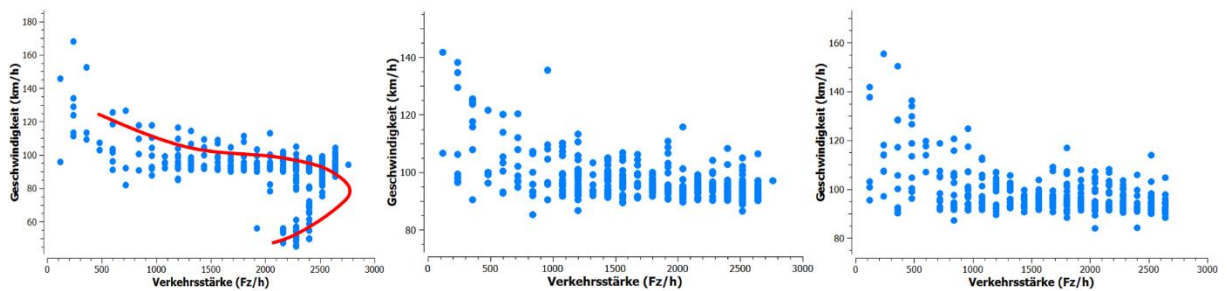


Abbildung 97: q-v-Diagramme für die Managed Lane bei QSV D 100 % in Sektor 6 für 0,1 €/km (l), 0,5 €/km (m) und 1 €/km (r)

Verkehrsstärke 120 % QSV D

Im Fall der hohen Verkehrsstärke von 120 % der QSV D kommt es, wie aufgrund der vorangegangenen Auswertungen zu erwarten war, über alle Sektoren, Fahrstreifen und Preisszenarien vermehrt zu Überlastungen.

In Sektor 2 ist die Managed Lane noch nicht überlastet, wie Abbildung 98 zeigt. Der Verkehr ist zwar gebunden, bleibt jedoch auf einem Geschwindigkeitsniveau über 80 km/h. Über den gesamten Querschnitt betrachtet, zeigt die Punktwolke eine Parabelform, wobei die Mehrzahl der Datenpunkte im oberen Parabelast angesiedelt ist und der untere Parabelast bei etwa 50 km/h endet. Damit ist der Verkehr im zäh fließenden Bereich angekommen, aber bislang nicht stockend.

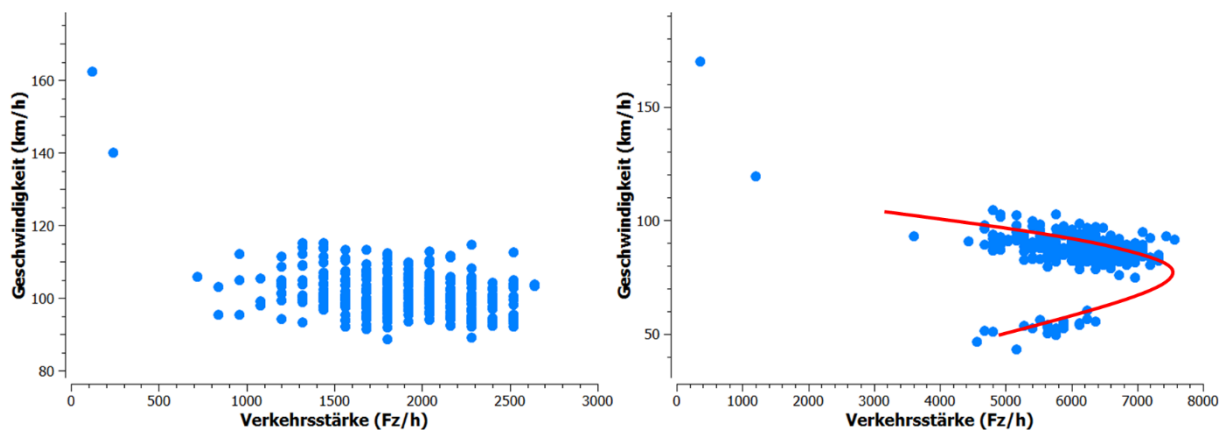


Abbildung 98: q-v-Diagramme für die Managed Lane (l) und den gesamten Querschnitt (r) bei QSV D 120 % in Sektor 2 bei 0,5 €/km

In Sektor 6 sind schließlich sowohl die Managed Lane als auch der Gesamtquerschnitt überlastet, wie Abbildung 99 zeigt. Insbesondere auf dem Gesamtquerschnitt liegen mehr als die Hälfte der Messpunkte auf dem unteren Ast der Parabel. Dabei sind noch zwei unterschiedliche Phasen auf dem unteren Ast erkennbar. So gibt es eine etwas ausgeprägtere Phase mit einer Geschwindigkeit von rund 50 km/h, also zäh fließendem Verkehr (BASt 2018)

und eine Phase mit stockendem Verkehr, mit Geschwindigkeiten von unter 30 km/h. Die Managed Lane zeigt eine große Varianz von Geschwindigkeiten für bestimmte Verkehrsstärken. Betrachtet man das Diagramm, so fallen die Werte sehr schnell ab.

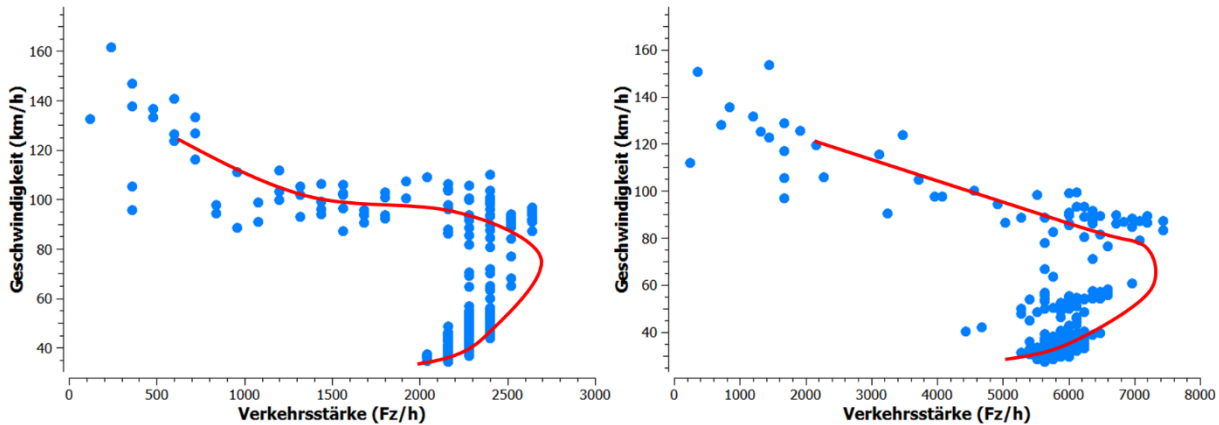


Abbildung 99: q-v-Diagramme für die Managed Lane (l) und den gesamten Querschnitt (r) bei QSV D 120 % in Sektor 6 bei 0,5 €/km

Innerhalb der unterschiedlichen Kostenszenarien treten keine größeren Unterschiede in den q-v-Diagrammen auf, wie Abbildung 100 zeigt. Zwar steigt bei höheren Kosten die Anzahl der Datenpunkte im oberen Parabelast an, was einen insgesamt flüssigeren Verkehrsablauf bedeutet, im Allgemeinen zeigen aber alle Fundamentaldiagramme ein überlastetes System, bei dem auch die Managed Lane in den zäh fließenden Bereich abrutschen.

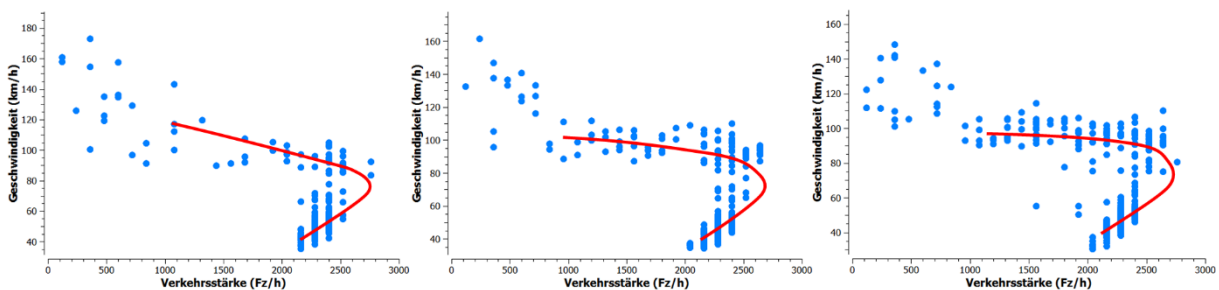


Abbildung 100: q-v-Diagramme für die Managed Lane bei QSV D 120 % in Sektor 6 für 0,1 €/km (l), 0,5 €/km (m) und 1 €/km (r)

4.7 Emissionen

Die Reduktion von Emissionen ist häufig eines der zentral angeführten Argumente für die Implementierung von Managed Lanes. Da das Themenfeld der Emissionen sehr weit gefasst und nicht zentrales Thema dieser Dissertation ist, daher werden im Folgenden nur die beiden Emissionsarten CO₂ und NO_x betrachtet. Wie auch für die Simulation der einzelnen Trajektorien wurde zur Bestimmung der Emissionen Aimsun next verwendet. Hierzu kommt

das London Emission Modell (LEM), welches als Erweiterung zu Aimsun next in das Programm integriert werden kann, zum Einsatz. Die Funktion des LEM ist in folgenden Quellen dargelegt, ebenso der Nachweis der wissenschaftlichen Qualität (EarthSense 2021; Aimsun 2023; Ma et al. 2021; Triantafyllos et al. 2019; Statista 2023a). Die Emissionsklassen wurden nach den Statistiken des deutschen Statistischen Bundesamtes gewählt (Statista 2023b). Wobei die Grundlagen der Emissionsentstehung aus (Merker und Teichmann 2014) stammen.

4.7.1 CO₂

CO₂ – Emissionen stellen den größten Anteil der sogenannten Treibhausgase, die eine erhebliche Umweltwirkung haben (European Commission. Joint Research Centre 2022) und sind zudem die größte Gruppe an Emissionen bei Verbrenner-PKW. Durch den perspektivisch höheren Durchsetzungsgrad der PKW-Flotte mit Elektro-Fahrzeugen, werden die direkten CO₂-Emissionen zurückgehen, während die CO₂-Emissionen dann gegebenenfalls bei der Stromerzeugung anfallen.

In Abbildung 101 ist eine Übersicht über die CO₂-Emissionen über die verschiedenen Szenarien dargestellt. Dabei handelt es sich um die Summe der Emissionen in der Spitzenstunde über die komplette Streckenlänge. Die roten Balken zeigen jeweils das Basis-Szenario, in dem noch keine Managed Lane implementiert ist, während die anderen Balken die unterschiedlichen Kosten-Szenarien darstellen. Wichtig zu beachten ist an dieser Stelle, dass durch das zugrunde gelegte Modell zur Verkehrsnachfrage, die Fahrzeugzahlen nicht linear über die verschiedenen Nachfragezustände ansteigen, sondern durch die unterschiedlichen Fahrwiderstände Verlagerungseffekte auftreten, was in Kapitel 4.4 und 4.5 gezeigt wurde.

Vergleicht man die Basis-Szenarien, so liegen die Werte für die geringe und die mittlere Verkehrsbelastung sehr eng zusammen. Dies hängt damit zusammen, dass bei der geringeren Verkehrsbelastung durchschnittlich höhere Geschwindigkeiten gefahren werden, was zu einem höheren CO₂-Ausstoß pro km führt. Die hohen Verkehrsstärken führen im Modell zu Einbußen bei der Leichtigkeit des Verkehrs, was sich auch in höheren Emissions-Werten widerspiegelt.

Betrachtet man ausschließlich das Szenario einer Verkehrsbelastung von 80 % QSV D, so liegt der CO₂-Ausstoß im Basis-Szenario über dem aller bepreisten Managed Lane Szenarien. Die Ursache hierfür ist, dass durch den Entfall eines Fahrstreifens die Kapazität für die regulären Fahrzeuge abnimmt und dadurch Einbußen bei der Leichtigkeit des Verkehrs entstehen. Da die Fahrzeuge jedoch nur langsamer fahren, es aber zu keinen größeren verkehrlichen Behinderungen kommt, ist der kumulierte Schadstoffausstoß geringer. Innerhalb der Kosten-Szenarien zeigt sich eine leicht abnehmende Tendenz bei der Menge an ausgestoßenem CO₂, was mit der Verlagerungswirkung auf Fahrgemeinschaften und den ÖPNV bei höheren Kostensätzen zusammenhängt.

Im Szenario der durchschnittlichen Verkehrsbelastung von 100 % QSV D liegen die Werte des Basis-Szenarios unter denen der Managed Lane Szenarien, wobei die Abstände gering sind. Es zeigt sich, dass durch den Entfall eines regulären Fahrstreifens die Verkehrsdichte so stark zunimmt, dass es zu Stop-and-Go-Verkehr sowie kleineren Stauungen kommt, die zu einem höheren CO₂-Ausstoß führen. Mit höheren Kosten steigt der Anreiz auf alternative Verkehrsträger wie den ÖPNV oder Fahrgemeinschaften zu wechseln, was insgesamt wieder zu einer Abnahme der Emissionen führt.

Im Fall der hohen Verkehrsmenge von 120 % der QSV D liegt die emittierte Menge an CO₂ im Basis-Szenario unter der der Managed Lane, wobei der Unterschied bei geringen Kostensätzen pro km besonders deutlich ausfällt. Die Gründe hierfür liegen erneut darin, dass bei geringen Kostensätzen der Anreiz auf die Managed Lane zu wechseln noch relativ groß ist und mit steigenden Preisen sowie hohen Fahrwiderständen die Attraktivität von Fahrgemeinschaften und dem ÖPNV deutlich steigt. Die höheren Verkehrszahlen in Verbindung mit einem potenziell instabilen Verkehrsablauf führen in Summe zu den gestiegenen Emissionen.

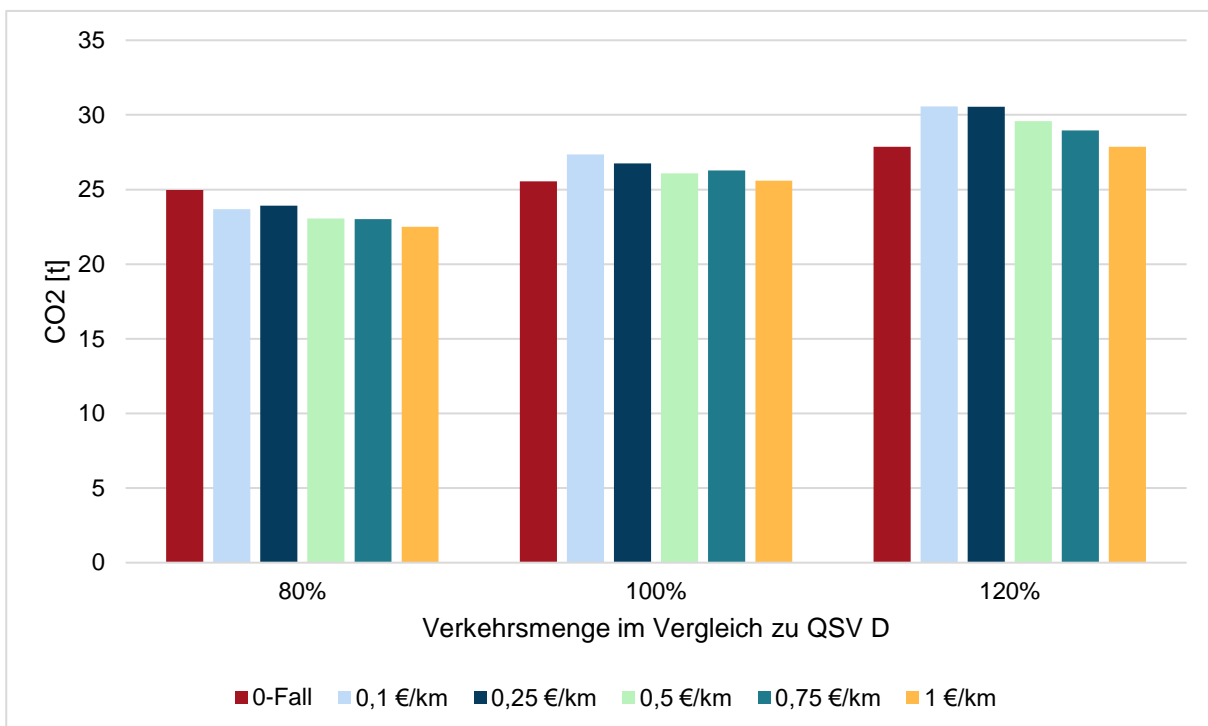


Abbildung 101: Übersicht CO₂-Emissionen

Nachdem in Abbildung 101 der CO₂-Ausstoß im Überblick über alle Szenarien dargestellt ist, zeigt Abbildung 102 die CO₂-Emissionen während der Spitzenstunde für die gesamte Strecke für den Fall einer Verkehrsbelastung von 100 % QSV D unter verschiedenen Kosten-Szenarien mit verdichteten Datenpunkten. Es ist ersichtlich, dass die CO₂-Emissionen mit steigenden Mautkosten abnehmen. Die einzige Ausnahme ist im Bereich um 0,75 €/km zu beobachten, wo die CO₂-Emissionen für einen kurzen Abschnitt kurzzeitig ansteigen. Um

diesen Anstieg der Werte zu referenzieren und die Möglichkeit eines fehlerhaften Ergebnisses in den Analysen auszuschließen, wurden die Berechnungspunkte in diesem Bereich verdichtet und in Schritten von 0,05 €/km fortgesetzt. Diese Verdichtung der Werte bestätigt den beobachteten Anstieg, dem dann ein stetiger Rückgang folgt. Insgesamt jedoch sinken die Emissionen während der Spitzenstunde um etwa zwei Tonnen CO₂. Diese Einsparungen können auf zwei Effekte zurückgeführt werden: Zum einen führt eine geringere Anzahl von Fahrzeugen zu geringeren Emissionen und zum anderen wird der Kraftstoffverbrauch, folglich die Emissionen aufgrund der Reduzierung von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen reduziert. Der erkennbare Anstieg bei 0,75 €/km deckt sich auch mit den Erkenntnissen bezüglich des vorübergehenden Anstiegs des SOV-Verkehrs, der bereits in Kapitel 4.5 beschrieben wurde. Daher sind die Ergebnisse der Simulationen konsistent. Zudem stimmen die Ergebnisse mit der Zunahme der Reisezeit im Bereich zwischen 0,6 €/km und 0,8 €/km überein, die ebenfalls in Kapitel 4.5 beschrieben wurde.

Relevant ist zudem der Vergleich der Ergebnisse mit dem Basisszenario. Dort belaufen sich die CO₂-Emissionen auf etwa 25,5 Tonnen pro Spitzenstunde, was niedriger ist als bei allen betrachteten Szenarien. Nur das Mautszenario von 1 €/km zeigt ähnliche Werte. Die Gründe hierfür liegen in den zunächst wesentlich häufigeren Beschleunigungs- und Bremsvorgängen aufgrund des deutlich dichteren Verkehrs auf den beiden regulären Fahrspuren, welche sich mit einer zunehmenden Homogenisierung des Verkehrs reduzieren.

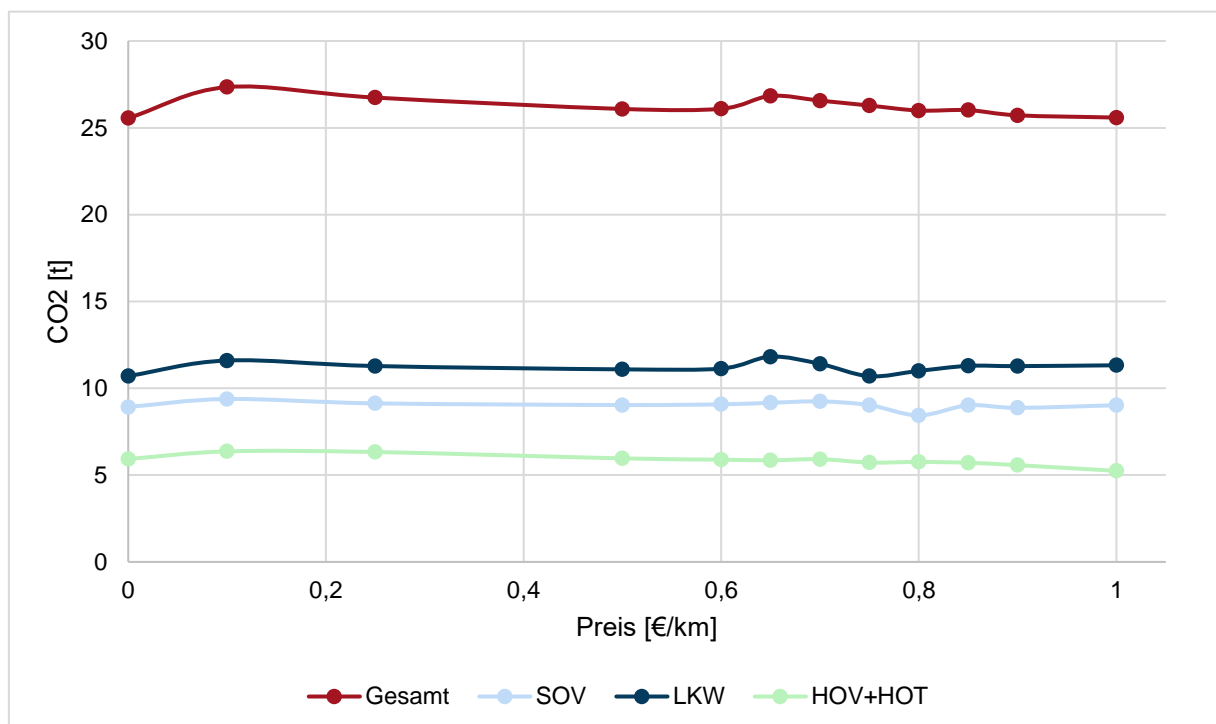


Abbildung 102: CO₂-Emissionen bei 100 % QSV D

Zuletzt werden in Abbildung 103 schließlich die CO₂-Emissionen pro Fahrzeuggruppe und Kilometer dargestellt. Die Darstellung des Schwerververkehrs wird hier von den PKW-basierten Verkehrsträgern getrennt, da ihre Emissionen achtmal höher sind als die der anderen

Fahrzeuggruppen, was die Abbildung deutlich schwieriger lesbar machen würde. Es ist daher wichtig zu beachten, dass selbst die Gesamtemissionen der hier dargestellten drei PKW-basierten Fahrzeuggruppen niedriger sind als die CO₂-Emissionen des Schwerververkehrs. Da die Werte für Nutzfahrzeuge deutlich höher sind als die für PKW, wird der Schwerverkehr in der Grafik als Balken anstelle eines Liniendiagramms dargestellt und hat eine eigene Achse mit entsprechenden Einheiten. Im Allgemeinen sind die Werte etwa fünfmal höher. Die Ergebnisse zeigen, dass die Emissionen der Fahrzeugtypen, die auf PKW-Verkehr basieren, sehr nah beieinander liegen und sich nur um wenige Gramm pro Kilometer unterscheiden, während es für Lastkraftwagen etwas größere Abweichungen gibt. Diese Ergebnisse korrespondieren mit den Ergebnissen zur Reisezeit aus Kapitel 4.5. Wie bereits mehrfach aufgezeigt, führen niedrigere Reisegeschwindigkeiten zu geringeren Schadstoffemissionen, was auch in dieser Analyse deutlich wird. Bereiche mit niedrigeren Geschwindigkeiten weisen die geringsten Emissionen auf. Überdies ist zu beobachten, dass mit zunehmender Verfügbarkeit der Managed Lane bei höheren Kilometerkosten der Verbrauch für die relativ schneller fahrenden HOT-Fahrzeuge zunimmt. Im Fall von SOVs kommt es zu einer Homogenisierung und teilweisen Beschleunigung des Verkehrs im Verlauf der Szenarien, was ebenfalls deutlich erkennbar ist. Auf die Darstellung der NO_x-Werte pro Fahrzeug wird in der Analyse im folgenden Unterkapitel verzichtet, da die Kurven nahezu identische Muster aufweisen. In beiden Fällen dominieren die Emissionen von Lastwagen die Gesamtemissionen, während die Geschwindigkeitsprofile von SOV-, HOV- und HOT-Fahrzeugen leicht unterscheidbar sind.

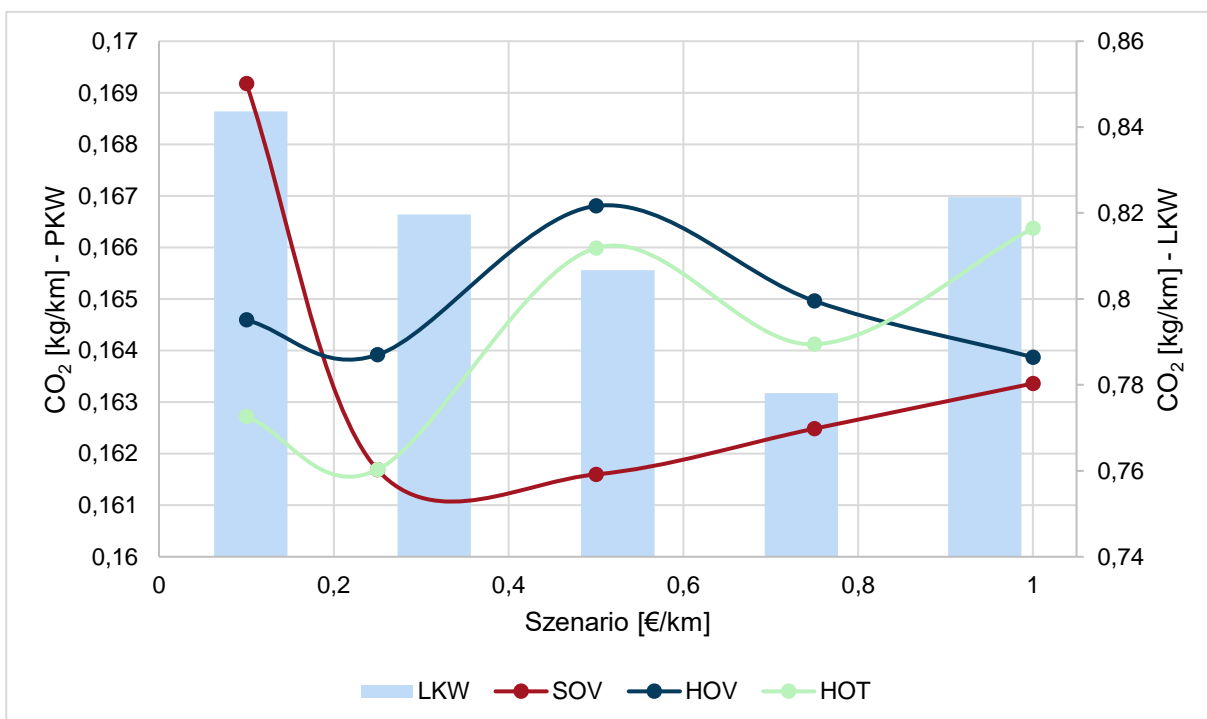


Abbildung 103: CO₂-Emissionen pro Fahrzeugklasse für 100 % QSV D

4.7.2 NO_x

Der Ausstoß von NO_x-Emissionen läuft grundsätzlich analog zu CO₂-Emissionen. Das bedeutet, dass hohe Geschwindigkeiten sowie häufige Brems- und Beschleunigungsvorgänge zu höheren Emissionen führen, wobei für NO_x-Emissionen die Beschleunigungsvorgänge eine besonders große Rolle spielen. (Amt der Oberösterreichischen Landesregierung 2015).

Wie bei den CO₂-Emissionen wird zunächst in Abbildung 104 ein Überblick über die NO_x-Emissionen über alle Szenarien gegeben. Dabei wird erneut die Summe der Emissionen über die komplette Strecke in der maßgebenden Spitzenstunde betrachtet. Die Verläufe der Emissionen ähneln sich in beiden Abbildungen. Erwartungsgemäß sind die durchschnittlichen Emissionen bei der geringsten Verkehrsstärke am niedrigsten und steigen mit den erhöhten Verkehrsmengen an. Dabei bewegen sich die Verläufe der Emissionen auf einem ähnlichen Niveau, ohne größere Abweichungen, unterscheiden sich aber um den Faktor 500 in der Menge.

Im Szenario mit den geringeren Verkehrsmengen lässt sich tendenziell eine leichte Abnahme der Werte bei steigenden Kosten pro km beobachten, wobei die NO_x-Werte bei geringen Kosten pro km, über denen des Basis-Szenarios liegen. Die Ursachen sind dabei die gleichen wie bei den CO₂-Emissionen. Durch den Entfall eines regulären Fahrstreifens kommt es auf den verbleibenden zwei Fahrstreifen zu dichterem Verkehr mit mehr Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen, die mit steigenden Kosten pro km abnehmen, da der ÖPNV und Fahrgemeinschaften eine größere Attraktivität entwickeln.

Für die mittlere Verkehrsbelastung ist ein deutlicher Anstieg der NO_x-Emissionen bei der Managed Lane gegenüber dem Basis-Szenario zu erkennen. Dieser reduziert sich in der Folge mit steigenden Kostensätzen pro km, liegt jedoch durchwegs über dem Basis-Szenario. Die Ursachen liegen erneut in einem deutlich verschlechterten Verkehrsfluss auf den regulären Fahrstreifen, in Verbindung mit hohen Geschwindigkeiten auf der Managed Lane.

Bei hohen Verkehrsmengen steigen die Emissionen ebenfalls stark an, wenn eine Managed Lane eingerichtet wird. Anders als bei den geringen oder mittleren Verkehrsstärken gibt es keine konstante Trendlinie, von sinkenden Emissionen bei steigenden Preisen. In diesem Szenario entstehen die höchsten Emissionen bei Kosten von rund 0,25 €/km und nehmen erst danach deutlich ab. Ursache hierfür ist, dass die hohe Verkehrsmenge einen größeren Anreiz schafft auf die Managed Lane zu wechseln und dafür zu bezahlen. Aufgrund der erheblich höheren Reisezeiten steigt auch die Bereitschaft einen höheren Preis pro km zu bezahlen, da der VOT noch über den zu zahlenden Kosten liegt. Erst bei deutlich höheren Mautgebühren überwiegen die Vorteile von ÖPNV und Fahrgemeinschaften, so dass die Zahl der Fahrzeuge abnimmt. Insgesamt liegen die Werte der Szenarien mit Managed Lane durchgehend über denen des Basis-Szenarios.

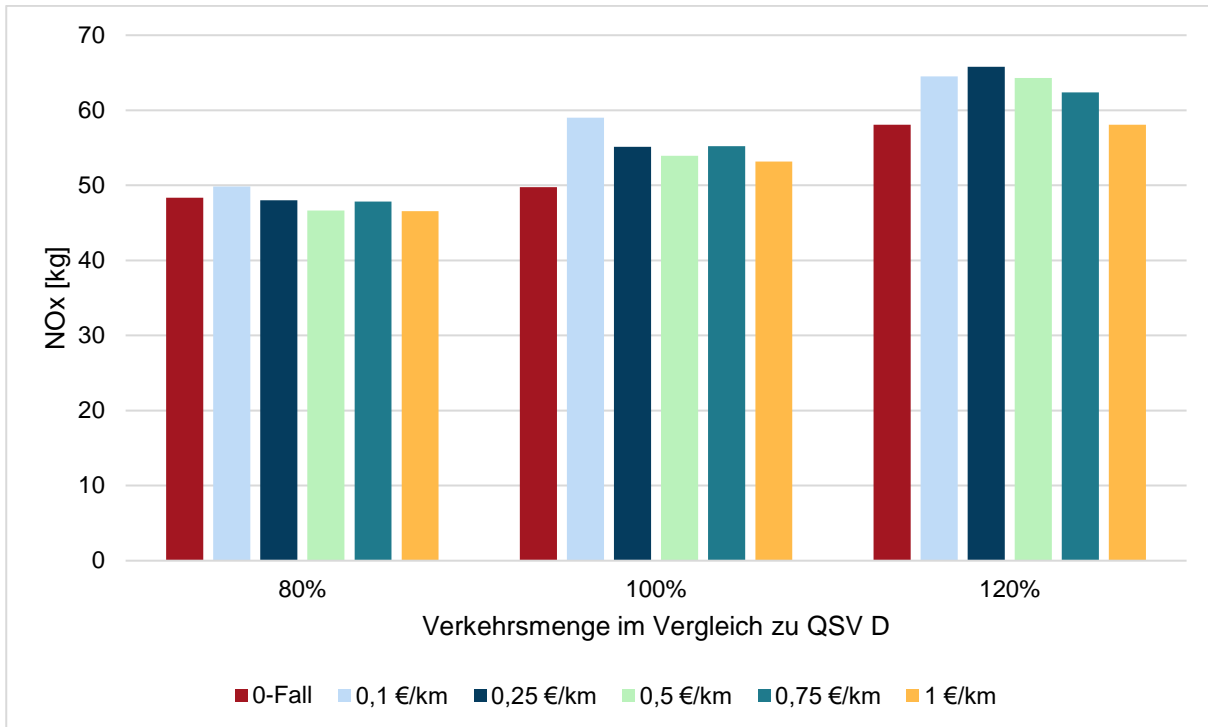


Abbildung 104: Übersicht NOx-Emissionen

Für den Fall einer Verkehrsbelastung von 100 % QSV D ist der Verlauf der NOx-Emissionen in Abbildung 105 mit verdichteten Datenpunkten dargestellt. Die Muster ähneln denen der CO₂-Emissionen, wobei die Werte zu Beginn stärker abfallen und sich zum Ende hin langsamer verringern. Im Fall der NOx-Werte ist jedoch der Anstieg im Szenario von 0,75 €/km noch deutlicher ausgeprägt. Ein Vergleich der Ergebnisse jedes Szenarios mit den Werten des Basisszenarios verdeutlicht noch stärker die Bedeutung eines stabilen und homogenen Verkehrsflusses. Im Basisszenario werden während der Spitzenstunden knapp unter 50 kg NOx pro Stunde emittiert, was über drei Kilogramm weniger sind als im günstigsten Szenario. Im Gegensatz dazu zeigt der ungünstigste Fall im Vergleich zum Basisszenario eine Zunahme von fast 10 kg NOx pro Stunde, was einem Anstieg von ungefähr 20 % entspricht.

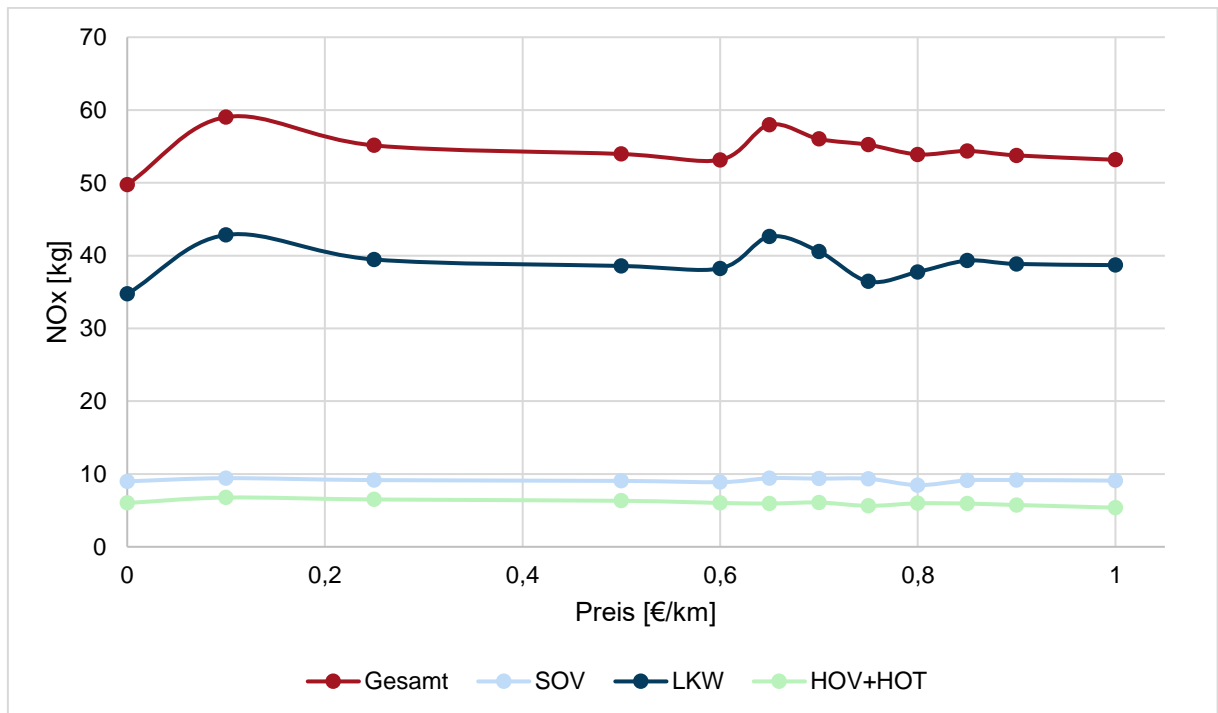


Abbildung 105: NOx-Emissionen bei 100 % QSV D

5. Bewertung und Erkenntnisse mit Umsetzungsmöglichkeiten

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln eine Analyse und Interpretation der Daten stattgefunden hat, soll nun eine kritische Einordnung erfolgen. Zudem sollen erste Schritte zur Realisierung und Rahmenbedingungen aufgezeigt werden.

5.1 Einordnung der Methodik

Im Rahmen dieser Dissertation kommen vier Methoden zum Einsatz, um die Potenziale von HOT-Lanes in Deutschland zu ermitteln. Diese sind:

- Literaturrecherche
- Umfrage zu Wünschen und Anforderungen von Pendlern in Deutschland
- Nachfrageformulierung mittels Strukturgleichungsmodellierung und multinominaler logistischer Regression
- Mikroskopische Verkehrsflusssimulation

Bei allen Verfahren handelt es sich um in der Forschung etablierte Methoden, die hier genutzt werden, um das neue Verfahren zur Ermittlung der Potenziale einer HOT-Lane zu entwickeln.

Literaturrecherche

Im Zuge der Literaturrecherche wurden über 160 nationale, vor allem aber internationale Quellen ausgewertet. Darunter waren neben wissenschaftlichen Aufsätzen und Tagungsbeiträgen auch Dissertationen, Projektberichte, Gesetze und Richtlinien sowie journalistische Beiträge. Der Fokus der Veröffentlichungen lag dabei im amerikanischen Raum, wo bislang auch die meisten Managed Lanes realisiert wurden. Im erweiterten europäischen Raum lag ein Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeiten in Israel sowie den Niederlanden. Insgesamt bietet die bestehende Literatur einen guten Überblick über das Themengebiet der Managed Lanes im Allgemeinen und den HOT-Lanes im Speziellen. Dennoch bestehen hier einige Risiken. Bei einigen Dokumenten merkt man die Begeisterung der Autoren für ihr Thema und ihre Überzeugung von der Technologie. Das birgt die Gefahr einer gewissen Voreingenommenheit, wenn es um die Bewertung von Ergebnissen geht. Zudem existiert das Themenfeld der Managed Lanes zwar seit Mitte des 19. Jahrhunderts, hat aber in den letzten Jahren insbesondere durch die Digitalisierung eine erhebliche Dynamik erfahren, so dass einige Ergebnisse auch wieder überholt sein können. Im Mobilitätssektor muss jedes Projekt stets individuell betrachtet werden, eine „Serienproduktion“ ist hier nicht möglich. Daher sind die Ergebnisse auch stets projektspezifisch zu sehen. Werden diese generalisiert, muss dies immer mit Vorsicht geschehen, da die Gefahr besteht, dass die Ergebnisse spezifische Komponenten enthalten, die nicht übertragen werden können.

Im Rahmen der Dissertation wurde versucht, diese Risikofaktoren zu berücksichtigen. Die Quellen wurden kritisch gewürdigt und keine Ergebnisse pauschal übernommen.

Umfrage

Umfragen können ein sehr wertvolles Instrument bei wissenschaftlichen Arbeiten sein, da sie direkt wie kaum eine andere Methode ermöglichen auch künftige Entwicklungen und die Einstellung dazu abzufragen. Sie ermöglichen die direkte Meinungsäußerung zu bestimmten Themen und liefern kurzfristig, wenn richtig durchgeführt, valide Ergebnisse. Dabei lassen sich verhältnismäßig leicht kausale Zusammenhänge verstehen, aber auch quantitative Analysen durchführen.

Demgegenüber sind Umfragen aber auch wie kaum eine Methodik anfällig für Verzerrungen und Verfälschungen. Dies beginnt bei zu kleinen Stichproben oder nicht korrekt ausgewählten Stichproben, die dann zu über- oder unterrepräsentierten Ergebnissen führen kann. Zudem besteht die Gefahr, dass Umfragen von bestimmten Interessengruppen gekapert werden, um diese in eine bestimmte Richtung zu beeinflussen. Andersherum können Teilnehmer auch geneigt sein, Antworten zu geben, die nicht ihrer Meinung entsprechen, sondern eher dem, was sie als sozial akzeptabel empfinden. Dies kann auch durch voreingenommene Frageformulierungen geschehen oder verstärkt werden und durch zu komplexe Fragestellungen oder missverständliche Formulierungen versehentlich erfolgen. Zudem müssen die eher technischen Probleme des Datenschutzes und möglicher ethischer Probleme vorab geklärt sein, bevor mit der Veröffentlichung einer Befragung begonnen werden kann.

Die vorgenannten Probleme waren vor Durchführung der Umfrage bekannt, so dass versucht wurde aktiv darauf einzugehen und sie zu vermeiden. Die Umfrage wurde vorab von verschiedenen und auf dem Themengebiet der Umfragen erfahrenen Personen kritisch geprüft und kommentiert. Um keine Voreingenommenheit bei der Auswahl der Umfrageteilnehmer zu riskieren, wurde die Umfrage über verschiedene soziale Medien verteilt sowie über verschiedene andere Wege verteilt. In Summe ist die Teilnehmerzahl mit 212 Personen grenzwertig gering, aber nach Rücksprache mit verschiedenen Experten noch aussagekräftig. Problematisch ist, dass die überwiegende Mehrheit der Umfrageteilnehmer aus dem süddeutschen Raum kommt und kaum Personen aus anderen Regionen Deutschlands gewonnen werden konnten. Insgesamt ist die Verteilung über die unterschiedlichen Attribute der Teilnehmer z. B. über Alter, Geschlecht und Wohnort repräsentativ. Insgesamt ist die Umfrage das mit den größten Risiken behaftete Element im Rahmen dieser Dissertation, sie erreicht aber in Summe ein befriedigendes Niveau und kann für die nächsten Schritte herangezogen werden.

Nachfrageformulierung mittels Strukturgleichungsmodellierung und multinominaler logistischer Regression

Um die erhobenen Daten der Umfrage in die Nachfrageermittlung einer HOT-Lane zu überführen, wurden die Daten zunächst mit der Strukturgleichungsmodellierung ausgewertet und anschließend mit der multinominalen logistischen Regression ausgewertet.

Die Strukturgleichungsmodellierung (SEM) ermöglicht die Untersuchung komplexer Beziehungen zwischen mehreren Variablen. Mit die größte Stärke von SEM ist die Fähigkeit, latente Konstrukte zu berücksichtigen, die nicht direkt beobachtbar sind. Dies erlaubt es, komplexe Theorien zu testen und zu validieren. Zudem kann die Stärke der Abhängigkeiten zwischen zwei oder mehr Variablen aufgezeigt werden. Die Gefahren der Strukturgleichungsmodellierung liegen in der Komplexität des Verfahrens und bei der Auswertung, die statistische Kenntnisse und der komplexen Berechnungen erfordern. Zudem neigt die SEM bei zu kleinen Stichproben zu Schwankungen und liefert damit erst ab einer gewissen Größe der Stichprobe zuverlässige Ergebnisse. Ein weiterer Nachteil ist die Sensitivität gegenüber fehlenden Daten, was die Gültigkeit der Ergebnisse beeinträchtigen kann.

Die multinominale logistische Regression (MNL) zählt zu den Standardverfahren bei der statistischen Analyse. Diese Methode ist besonders nützlich, wenn die abhängige Variable mehr als zwei Kategorien hat. MNL ermöglicht die Untersuchung von Beziehungen zwischen mehreren unabhängigen Variablen und einer kategorialen abhängigen Variable. Sie ist einfach zu verstehen, zu implementieren und erfordert keine Annahmen über die Verteilung der unabhängigen Variablen. Damit können hiermit aus den komplexen Ergebnissen der SEM die Gleichungen der Nachfrage der HOT-Lane formuliert werden. Allerdings ist die MNL in ihrer Komplexität limitiert und benötigt hier die Vorarbeit der SEM, um funktionieren zu können.

Bezogen auf diese Dissertation bietet die Kombination der beiden Verfahren die Möglichkeit der Modellierung komplexer Beziehungen zwischen latenten und manifesten Variablen, einschließlich der Untersuchung von Mediations- und Moderationseffekten. Die Integration von MNL in dieses Rahmenwerk ermöglicht eine präzise Analyse der Beziehungen zwischen latenten Konstrukten und kategorialen Endpunkten. Während SEM die Struktur und Messmodelle überprüft, fokussiert sich MNL auf die spezifischen Effekte auf die kategorialen Ergebnisse. Diese Kombination erlaubt eine tiefgreifende und umfassende Untersuchung komplexer Forschungsfragen, die sowohl latente Konstrukte als auch mehrere kategoriale Endpunkte einschließen. Damit lassen sich die Ansätze zur Nachfragemodellierung möglichst exakt modellieren.

Insgesamt zeigt sich die in dieser Dissertation formulierte Nachfrage robust und liefert auch im Rahmen der Sensitivitätsanalysen gute Ergebnisse.

Mikroskopische Verkehrsflusssimulation

Die mikroskopische Verkehrsflusssimulation zählt seit Jahrzehnten zu den Standardverfahren der Verkehrstechnik. Sie hat den Vorteil, auch künftige Verkehrsentwicklungen realitätsnah darzustellen. Dabei können auch verschiedene Fahrzeugtypen oder verkehrliche Auflagen berücksichtigt werden. Die Auswirkungen von Planungen können damit frühzeitig überprüft und vorab erste Evaluierungen und Optimierungen durchgeführt werden. Über die Darstellung einzelner Fahrzeuge lassen sich auch lokale Effekte gut darstellen.

Um eine gute Ergebnisqualität zu erreichen, müssen allerdings die Eingangsdaten ein gewisses Niveau erreichen. Hier können die Ergebnisse nur so gut sein wie die Eingangsgrößen. Zudem sind eine gewissenhafte Kalibrierung und Validierung des Modells erforderlich, damit die Fahrzeuge ein realistisches Verhalten zeigen. Aktuell gibt es hierfür noch keine einheitlichen Standards, so dass diese Arbeit stets neu gemacht werden muss. Da in dieser Dissertation ein synthetisches Modell zum Einsatz kommt, fehlen die oben genannten Referenzdaten. Das hat den Vorteil, dass durch ein generalisiertes Netz eine leichtere Übertragbarkeit der Aussagen möglich ist, andererseits lauern hier neue Gefahren, da die Möglichkeiten zur Validierung begrenzt sind und durch die synthetische Strecke und die synthetische Nachfrage unrealistische Annahmen möglich sind. Die Interpretation der Daten spielt im letzten Schritt eine zentrale Rolle. Hier müssen die synthetischen Ausgangswerte berücksichtigt und entsprechend für die Realität interpretiert werden.

Auf diese Dissertation bezogen, kommt ein synthetisches Modell zum Einsatz. Die Grundlage hierfür ist das Muster der HBS 2015, das einen durchschnittlichen deutschen Autobahnquerschnitt darstellt. Als Nachfrage wird eine durchschnittliche Zielbelastung der Qualitätsverkehrsstufe D erstellt. Die Validierung und Kalibrierung erfolgten anhand des möglichst realistischen Verhaltens der Verkehrsteilnehmer. Die Parameter wurden anhand der Richtlinien der FGSV und den Parametern von AIMSUN gewählt. In Summe ergeben sich realistische Werte, die ein stimmiges Gesamtbild ergeben. Trotz der aufgezeigten Unsicherheiten können die gefundenen Ergebnisse als gut und valide bezeichnet werden.

Gesamtschau

In der Gesamtschau sind einige Ergebnisse dieser Dissertation mit Unsicherheiten behaftet. Dies kann nicht vermieden werden, wenn ein bislang noch nicht implementiertes System untersucht wird. Wie aber die einzelnen Schritte zeigen, sind die Ergebnisse stimmig und belastbar. Der methodische Aufbau und die intensive Datenanalyse zeigt äußere Einflüsse auf und minimiert diese. Die Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt mögliche Risiken und bindet sie in die Auswertung mit ein. Die hohe Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Analysemethoden und eine kritische Auseinandersetzung mit potenziellen Fehlerquellen stärken die Zuverlässigkeit der Resultate. Trotz der anerkannten Risiken unterstreicht die Kombination dieser Faktoren die Qualität und Aussagekraft der vorliegenden Forschungsergebnisse.

5.2 Einsatzmöglichkeiten und – Grenzen

Die Bandbreite der verfügbaren Managed Lane Systeme ist enorm. Entsprechend weit ist auch das Feld der Einsatzmöglichkeiten und Grenzen. Diese müssen für jeden Typ von Managed Lane individuell geprüft und auf die örtlichen Gegebenheiten hin untersucht und gegebenenfalls angepasst werden. In der vorliegenden Dissertation wurde das zunächst sehr umfangreiche Themengebiet der Managed Lanes auf die HOT-Lanes und deren Anwendbarkeit in Deutschland fokussiert.

Betrachtet man die vorangegangenen Kapitel, so zeichnet sich ein klares Bild, welche Einsatzmöglichkeiten sich für Managed Lanes, insbesondere HOT-Lanes, bieten, aber auch wo die Grenzen zur Implementierung einer solchen Managed Lane liegen. Dabei haben sich insbesondere folgende Rahmenbedingungen herauskristallisiert, die im Folgenden nochmals genauer erläutert werden:

- Ausreichend lange Nutzungslänge der HOT-Lane
- Ausreichende Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der HOT-Lane und den regulären Fahrstreifen
- Geeignete Verkehrsbelastung, die nicht zu gering, aber auch nicht komplett überlastet sein darf
- Geeignetes Preisregime zur Nutzung der HOT-Lane erforderlich, um die gewünschten Anreize zu setzen
- Klare Definition der Anforderungen und in Kauf genommenen Kosten erforderlich
- Klare Rahmenbedingungen aus Politik und Verwaltung erforderlich
- Geeignete Infrastruktur erforderlich
- Geeignete Start- und Endpunkte erforderlich

Ausreichend lange Nutzungslänge der HOT-Lane

Um die Wirksamkeit der Managed Lane voll entfalten zu können, benötigen die Fahrzeuge eine ausreichend lange Nutzungslänge auf der Managed Lane. Geht man, wie in dieser Dissertation geschehen, von einer linksliegenden HOT-Lane aus, müssen sich die Nutzer zunächst auf die Managed Lane verflechten, wenn sie auf die Autobahn auffahren und zurück verflechten, wenn sie die Autobahn wieder verlassen wollen. Diese Verflechtungsvorgänge kosten Zeit und können unter Umständen die Reisezeitgewinne der Managed Lane Nutzung konsumieren oder sogar übersteigen. Der Anreiz zur Nutzung der Managed Lane entfällt somit. Zudem können Zeitverluste durch Hol- und Bring-Fahrten bei der Bildung von Fahrgemeinschaften entstehen. Die vorliegenden Daten zeigen, dass im vorliegenden synthetischen Netz eine durchschnittliche Nutzungslänge von etwas über 5 km den Break-Even-Point zur Nutzung einer Managed Lane darstellt. Bei kürzeren Strecken nutzen hauptsächlich diejenigen die Managed Lane, die bereits bisher eine Fahrgemeinschaft eingegangen sind. An dieser Stelle ist jedoch festzuhalten, dass die Schwellenwerte zur Nutzung einer Managed Lane für jedes Projekt unterschiedlich sein können und beispielsweise

von der Verkehrsbelastung, Geschwindigkeitsdifferenzen oder der Art und Lage der Managed Lane abhängen.

Ausreichende Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der HOT-Lane und den regulären Fahrstreifen

Um den Erfolg einer Managed Lane, insbesondere einer HOT-Lane dauerhaft zu gewährleisten, ist es wichtig eine relevante Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Fahrstreifen zu erreichen. Die Geschwindigkeitsdifferenzen sind dabei aus zwei Gründen bedeutsam. Zudem werden nur so faktische Vorteile durch die Managed Lane erreicht, die auch langfristig zu einem Erfolg der Managed Lane beitragen, zum anderen spielt für den kurzfristigen Erfolg auch der psychologische Faktor eine große Rolle, wenn Verkehrsteilnehmer auf einer Managed Lane entsprechend schneller an Fahrzeugen auf einem anderen Fahrstreifen vorbeifahren können.

Im Rahmen der Simulationen zeigt sich mit zunehmenden Geschwindigkeitsdifferenzen eine gesteigerte Wirksamkeit der Managed Lane. Die Verringerung von Reisezeiten und die Optimierung des Verkehrsflusses sind zumeist die primären Ziele der Implementierung von Managed Lanes. Bei zu geringen Geschwindigkeitsunterschieden kann jedoch die Erwartung, dass die Verkehrsteilnehmer von einer beschleunigten und störungsfreien Fahrt profitieren, nicht erfüllt werden. Dies kann zur Unzufriedenheit bei den Nutzern führen und die Akzeptanz des Systems beeinträchtigen. Um die Managed Lane optimal zu unterstützen, bieten dynamischen Verkehrsbeeinflussungsanlagen ein großes Potenzial, um durch Homogenisierung und verkehrssteuernde Maßnahmen die Leistungsfähigkeit zu steigern.

Geeignete Verkehrsbelastung erforderlich

Zentrales Element, wenn es um den Erfolg einer Managed Lane geht, ist die Verkehrsbelastung, die weder zu hoch noch zu gering sein darf. Dabei ist sowohl die Verkehrsstärke auf der Managed Lane als auch auf den regulären Fahrstreifen relevant.

Auf der Managed Lane sind dabei zwei Grundsätze zu beachten. Zum einen muss die Verkehrsbelastung der Managed Lane immer geringer sein als die der regulären Fahrstreifen, zum anderen darf die Verkehrsbelastung auf der Managed Lane nicht die Qualitätsstufe D des HBS übersteigen. Die Ursachen hierfür sind offensichtlich. Ist die Verkehrsbelastung auf der Managed Lane höher als auf den regulären Fahrstreifen, gibt es keinen sinnvollen Anreiz mehr, um auf die Managed Lane zu wechseln. Zudem ist es insbesondere aus psychologischen Gründen wichtig, dass der Verkehrsfluss auf der Managed Lane dauerhaft stabil ist. Würde der Verkehr auf der Managed Lane stocken, fiel für viele Nutzer der Anreiz zum Wechsel weg, auch wenn die Reisezeit immer noch schneller wäre als auf den regulären Fahrstreifen. Aus Gründen des Verkehrsflusses ist eine zu geringe Verkehrsmenge auf der Managed Lane nicht relevant, für die gesellschaftliche Akzeptanz ist jedoch dringend darauf zu achten, dass die Auslastung der Managed Lane angemessen ist. Angemessen bedeutet in

diesem Zusammenhang, dass es kein Übermaß an freien Kapazitäten auf dem Fahrstreifen gibt, während die regulären Fahrstreifen hoch- oder überlastet sind.

Auf den regulären Fahrstreifen muss die Verkehrsbelastung höher sein als auf der Managed Lane, allerdings dürfen die Fahrstreifen nicht stark überlastet sein. Kommt es auf den regulären Fahrstreifen zu erheblichen Stauungen, können die Fahrzeuge der Managed Lane nicht mehr von und zu den Anschlussstellen verflechten. Dadurch kommt es auch auf der Managed Lane zu Behinderungen, wenn die Fahrzeuge nicht mehr geordnet auf- und abfahren können und zum Verflechten ihre Geschwindigkeit drastisch reduzieren müssen. Dabei ist es aber auch relevant, ob die Mehrzahl der Nutzer die Managed Lane von Anfang bis Ende durchfährt oder ob über den Streckenverlauf ein starker Wechsel stattfindet.

Die geeignete Verkehrsbelastung muss für jedes Projekt individuell geprüft werden. Allerdings lassen sich aus den Simulationen dieser Arbeit die Erkenntnisse ableiten, dass HOT-Lanes bei den Qualitätsstufen A und B sowie mit Abstrichen bei C keine Wirksamkeit entfalten und Verkehrsmengen im oberen Bereich der Qualitätsstufe E sowie in F zu deutlichen Einschränkungen auch bei der Nutzung der Managed Lane führen.

Geeignetes Preisregime zur Nutzung der HOT-Lane erforderlich

Das vermutliche zentrale Steuerungselement bei HOT-Lanes ist die Preisgestaltung. Dabei müssen erneut zwei Elemente bedacht werden. Einerseits entfalten hohe Kosten eine starke Steuerungswirkung und verstärken die Anreize für den Umstieg in Fahrgemeinschaften und auf den ÖPNV. Allerdings werden hohe Mobilitätskosten in der öffentlichen Wahrnehmung häufig als sozial ungerecht eingestuft. Demgegenüber wirken geringe Kostensätze pro Kilometer als Pull-Faktoren, die zu einer verstärkten Nutzung der Managed Lane auf Bezahl-Basis führen. Dies kann zum einen zu einer Überlastung der Managed Lane führen und konterkariert die Ziele einer Stärkung des ÖPNV und von Fahrgemeinschaften.

In der Praxis empfiehlt sich eine dynamische Preisgestaltung, deren Algorithmus auf die Rahmenbedingungen und Ziele der Managed Lane abgestimmt ist. Zudem müssen die regional unterschiedlichen Zeitwerte berücksichtigt werden.

Klare Definition der Anforderungen und in Kauf genommenen Kosten erforderlich

Managed Lanes haben einen deutlichen Einfluss auf den Verkehrsablauf. Dabei können sowohl positive als auch negative Effekte auftreten. Wird, wie in dieser Doktorarbeit angenommen, kein zusätzlicher Fahrstreifen für die Managed Lane errichtet, sondern zu Lasten der regulären Fahrstreifen implementiert, ist mit erheblichen Änderungen bei der Leichtigkeit und gegebenenfalls sogar der Sicherheit des Verkehrs zu rechnen. Vor Beginn eines Projektes zur Implementierung einer Managed Lane müssen daher klar die Anforderungen an eine Managed Lane definiert werden und definiert, welche Kosten in Kauf genommen werden. Hierzu ist eine umfassende Analyse der Anforderungen erforderlich, die die Bewertung von Verkehrsmustern, Kapazitätsbedarf, Geschwindigkeitsanforderungen,

Sicherheitsaspekten und Umwelteinflüssen umfasst. Diese Faktoren dienen als Grundlage für die Konzeption und Gestaltung der Managed Lane und bilden den Rahmen für die erfolgreiche Implementierung des Systems. Nur eine klare Definition der Ziele des Projektes ermöglicht eine zielgenaue Planung der Maßnahme. Dabei müssen die Ziele klar benannt sein und dürfen nicht miteinander in Widerspruch stehen. So ist festzulegen, ob der Fokus der Managed Lane auf einem besseren Verkehrsfluss, einer Verlagerung der Nachfrage auf emissionsärmere Verkehrsmittel wie Fahrgemeinschaften oder den ÖPNV, oder aber der Reduktion von Emissionen liegt. Globale Aussagen, wie „alles ist wichtig“ sind hier nicht zielführend und dringend zu vermeiden. Zudem müssen Zielkorridore angegeben werden, die zur Verbesserung angestrebt werden. Diese können durch regelmäßige Evaluierungen regelmäßig angepasst werden.

Neben den positiven Effekten der Managed Lane, treten für die Pendler und die Allgemeinheit auch Kosten auf. Diese können in Form von Reisezeitverlusten, höheren monetären Reisekosten oder erhöhten Emissionen entstehen. Zudem können durch Verkehrsverlagerungen auch Effekte in nicht direkt von der Maßnahme betroffenen Räumen auftreten. Wie die Ziele der Managed Lane, müssen auch die vertretbaren Kosten vorab klar benannt und in den Planungen berücksichtigt werden. So können beispielsweise in die Algorithmen zur Steuerung der HOT-Lane maximale Reisezeitverluste auf den regulären Fahrstreifen eingebaut oder ab einer gewissen Emissionsmenge steuernd eingegriffen werden.

Klare Rahmenbedingungen aus Politik und Verwaltung erforderlich

Für den Projekterfolg einer Managed Lane sind klare Rahmenbedingungen von Politik und Verwaltung unerlässlich. Zum einen muss durch ein offensives, positives Projektmarketing das Projekt frühzeitig platziert und dann auch dauerhaft und transparent begleitet werden. Zum anderen müssen die rechtlichen und organisatorischen Rahmenbedingungen gegeben sein.

Durch klare und stabile Leitlinien der Politik, die die oben genannten Anforderungen und Kosten einer Maßnahme maßgeblich beeinflussen, muss ein öffentliches Verständnis für das Projekt geschaffen werden. Zudem muss mit einem geeigneten gesetzlichen Rahmen die rechtssichere Umsetzung einer HOT-Lane sichergestellt werden. Hier ist eine effektive Zusammenarbeit mit der Verwaltung und dabei insbesondere der operativen Ebene unerlässlich. Dabei geht es um Themen wie die Kontrolle und gegebenenfalls Sanktionierung einer Fehlnutzung der Managed Lane, der Abrechnung der Mautkosten sowie die Verwendung dieser Einnahmen oder aber auch den Themenkomplex von Planung, Bau, Betrieb und Unterhalt der Managed Lane. Hier müssen die Verantwortlichkeiten und Zuständigkeiten klar geregelt sein.

Geeignete Infrastruktur erforderlich

Ein nicht zu vernachlässigendes Element für den Projekterfolg einer Managed Lane ist das Vorhandensein der notwendigen und auch geeigneten Infrastruktur. Wie genau diese

ausgestaltet ist, ist dabei vom jeweiligen Einzelprojekt mit den jeweiligen Projektzielen abhängig. Sollen etwa Fahrgemeinschaften und der ÖPNV gestärkt werden, so empfiehlt sich eine gute Infrastruktur an Park-and-Ride-Parkplätzen im Umfeld der Managed Lane, um den Menschen die Möglichkeit zum Umstieg in eine Fahrgemeinschaft zu bieten. Ein sehr gelungenes Beispiel ist hier die Kvisch 1 in Israel, die in dieser Doktorarbeit bereits mehrfach erwähnt wurde.

Wird die Managed Lane als HOT-Lane ausgeführt, sind zudem die erforderlichen Einrichtungen zum Anzeigen der aktuellen Gebühren, der Nutzererfassung sowie der Kontrolle notwendig. Hierzu ist die Errichtung von Schilderbrücken mit dynamischen Anzeigen erforderlich. Die Erfassung der Fahrzeuge kann gegebenenfalls auch über bereits bestehende Systeme von TollCollect erfolgen, allerdings wäre hier dann gegebenenfalls eine Verdichtung der Kontrollstandorte erforderlich. Die Verkehrsleitzentralen oder andere geeignete Organisationseinheiten müssen mit dem Wissen und der Software aufgerüstet werden, um die Preisgestaltung und Steuerung der Managed Lane übernehmen zu können. Zudem werden Sicherheits- und Informationssysteme erforderlich, die auch über mobile Endgeräte ausgespielt werden können. Um eine möglichst effiziente Nutzung der Managed Lane zu ermöglichen, können darüber hinaus noch dynamische Verkehrsbeeinflussungsanlagen erforderlich werden.

Für die Wahrnehmung und Akzeptanz sowie um unbewusste Fehlnutzungen zu vermeiden, ist eine klare Markierung und gegebenenfalls räumliche Abgrenzung der Managed Lane erforderlich.

Abseits der Straße trägt ein leistungsfähiges, attraktives ÖPNV-Angebot zu einer Verlagerung im Modal Split bei.

Geeignete Start- und Endpunkte erforderlich

Bei der Planung und Umsetzung von Managed Lanes und insbesondere HOT-Lanes ist es von entscheidender Bedeutung, die Sicherheit in den Verflechtungsbereichen zu gewährleisten, da diese Bereiche besonders anfällig für erhöhtes Unfallgeschehen sind. Die vermehrten Spurwechsel der Verkehrsteilnehmer erfordern eine klare und gut durchdachte Verkehrsregelung, um potenzielle Gefahrensituationen zu minimieren. Hierzu zählt auch eine rechtzeitige, eindeutige und klar erkennbare Markierung der Managed Lane im Zulaufbereich.

Idealerweise sollten die Start- und Endpunkte einer Managed Lane im Bereich von Autobahnkreuzen oder Autobahndreiecken liegen, wo die Geschwindigkeiten geringer sind und die Verkehrsteilnehmer in den meisten Fällen eine erhöhte Aufmerksamkeit an den Tag legen. Die klare Kennzeichnung der Einfahrten und Ausfahrten sowie eine angemessene Signalisierung sind entscheidend, um den Verkehrsteilnehmern eine sichere und leicht verständliche Orientierung zu bieten.

In Bezug auf die Gestaltung von Managed Lanes hat sich gezeigt, dass eine Spuraddition, bei der eine zusätzliche Fahrspur hinzugefügt wird, im Vergleich zu einer spontanen Umwandlung eines regulären Fahrstreifens in eine Managed Lane eine sicherere Option darstellt. Das stumpfe Ende eines regulären Fahrstreifens führt in der Praxis häufig zu einer unbeabsichtigten Fehlnutzung und gefährlichen Verkehrssituationen durch starkes Abbremsen vor Beginn der Managed Lane.

Das Ende einer Managed Lane ist in der Regel weniger unfallkritisch als der Beginn. Im Gegensatz zum Beginn ist hier auch eine verkehrssichere Lösung an einer Anschlussstelle oder in der freien Strecke möglich. Dies bedingt jedoch die Einrichtung klar gekennzeichnete Übergangsbereiche und eine entsprechende Geschwindigkeitsregelung, um einen reibungslosen Übergang zwischen der Managed Lane und den regulären Fahrstreifen zu gewährleisten und potenzielle Risiken und Verkehrsbehinderungen zu minimieren.

5.3 Technische Ausstattung

Welche technische Ausstattung eine HOT-Lane benötigt, ist für jedes Projekt unterschiedlich und von der konkreten Planung und Umsetzung abhängig. Dennoch gibt es eine Reihe von Elementen, die standardmäßig vorkommen. Im Folgenden wird beispielhaft für das in Kapitel 4 verwendete synthetische Modell aufgezeigt, welche konkreten baulichen und

organisatorischen Maßnahmen dort unter den getroffenen Annahmen notwendig wären. Als Referenz kann beispielsweise Abbildung 106 herangezogen werden.



Abbildung 106: Beispiel HOT-Lane als Referenz (City Observatory 2017)

Beschilderung

Zentrales Element für die Einrichtung einer Managed Lane ist die korrekte Beschilderung. Da bislang keine HOT-Lanes in Deutschland eingeführt sind und auch in den Regelwerken nicht vorkommen, werden hier die Anforderungen auf Grundlage der bestehenden Regelwerke erarbeitet. Basis hierfür ist die RWBA (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 06/2006), die „Richtlinien für die wegweisende Beschilderung an Bundesautobahnen“. Als Referenz wird die Beschilderung an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen herangezogen, da die Managed Lane einen größeren Vorlauf und Verflechtungsbereich benötigt. Dies passt auch zu der im Rahmen dieser Arbeit abgeleiteten Empfehlung, HOT-Lanes an Autobahndreiecken und Autobahnkreuzen beginnen zu lassen. Daraus ergibt sich, dass vor Beginn der Managed Lane vier Überkopf-Beschilderungen erforderlich sind, wie in Abbildung 107 dargestellt. Durch die Verflechtungslänge von 2.000 m gibt es eine ausreichende Möglichkeit, sich auf die korrekte Fahrbahn einzusortieren. Zudem bieten sich Managed Lanes insbesondere auf Strecken mit hohem Pendleranteil an, so dass hier zusätzlich von einem hohen Gewohnheitsfaktor der Verkehrsteilnehmer auszugehen ist.

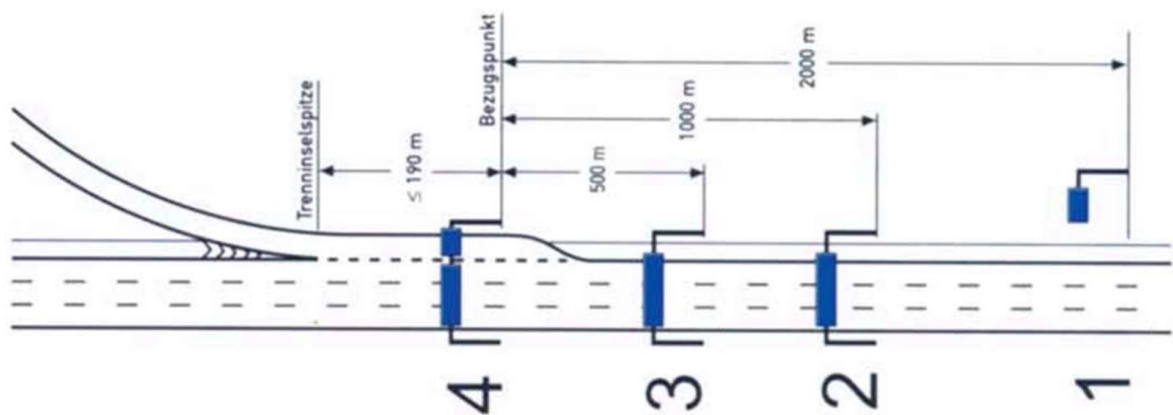


Abbildung 107: Beschilderung Beginn Managed Lane (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 06/2006)

Zudem sollte die Managed Lane über ihre komplette Länge mit regelmäßigen Informationstafeln beschildert sein. Der Abstand der einzelnen Schilder sollte 1.000 m nicht übersteigen.

Das Ende der Managed Lane sollte ebenfalls 1.000 m vor dem Ende der HOT-Lane mittels Überkopf-Beschilderung angekündigt und mit dem Ende der HOT-Lane nochmals wiederholt werden.

Die aktuellen Kosten für die HOT-Lane müssen ab der ersten Ankündigungstafel in die Beschilderung integriert werden, wie dies beispielsweise in den USA der Fall ist (siehe Abbildung 108).



Abbildung 108: Angabe Kosten HOT-Lane (FHWA 2020)

Markierung

Die Markierung ist von zentraler Bedeutung, um eine Fehlnutzung der HOT-Lane zu vermeiden und um sie in der Strecke klar zu kennzeichnen. Wie bei der Beschilderung gibt es derzeit in Deutschland noch keine gültige Richtlinie für die Markierung von HOT-Lanes, so dass auf die bestehenden nationalen und internationalen Regelwerke zurückgegriffen wird. Hierfür bietet sich eine Doppelmarkierung in Breitstrich mit Markierungsnägeln zwischen den beiden Linien an, wie in Abbildung 109 dargestellt. Je nach gewünschter Nutzung kann die Markierung auch mit einer linksseitig unterbrochenen Leitlinie ausgeführt werden oder durchgängig als doppelt ausgeführte Leitlinie, wie in Abbildung 110. Mindestens im Verflechtungsbereich, der rund 2.000 m vor einer Anschlussstelle beginnen und rund 1.000 m nach der Anschlussstelle enden sollte, ist die Leitlinie einzusetzen. Die Markierung selbst ist dabei nach den aktuell gültigen Bestimmungen der „Richtlinien für die Markierung von Straßen“ (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 12/2019) auszuführen.



Abbildung 109: Markierung Managed Lane (Ruch Verkehrstechnik 2023)



Abbildung 110: Markierung Managed Lane im Verflechtungsbereich

Mautsysteme

In den Fahrzeugen sowie entlang der Strecke muss eine geeignete technische Ausstattung zur Erhebung der anfallenden Mautgebühren vorhanden sein. Bei bestehenden HOT-Lanes in den USA sowie bei der LKW-Maut in Deutschland haben sich Transponder-Systeme, auch On-Board-Units genannt, bewährt, die ein Fahrzeug zweifelsfrei identifizieren und den jeweiligen Tarif abrechnen. Als Beispiel für einen solchen Transponder ist in Abbildung 111 das System der Firma TollCollect aus Deutschland abgebildet, mit der die LKW-Maut erhoben wird.



Abbildung 111: On Board Unit – Mauterfassung (Toll Collect 2023)

Entlang der Strecke müssen in regelmäßigen Abständen Sender installiert werden, die zum einen prüfen, ob die Fahrzeuge mit entsprechenden Transpondern ausgestattet sind und zum anderen die zurückgelegte Strecke erheben.

Ein zentrales Problem bei den HOT-Lanes ist, dass Fahrgemeinschaften kostenlos fahren können. Hier ist aktuell noch keine datenschutzkonforme, automatisierte Lösung verfügbar. Aktuell gibt es Ansätze mit Wärmebildern sowie der Nutzung von Smartphones und KI-gestützter Bildauswertung. In der Praxis hat sich bisher keines dieser Systeme flächendeckend durchgesetzt. Auf der Kvisch 1 in Israel wird der Besetzungsgrad der HOT-Lane durch Kontrollpersonal erfasst, in den USA finden regelmäßige Kontrollen zum angegebenen Besetzungsgrad durch die Polizei statt.

Verkehrsdatenerfassung

Für die Akzeptanz und Wirksamkeit der HOT-Lane ist es relevant, dass auf der Managed Lane stets ein optimaler Verkehrsfluss herrscht. Um dies zu gewährleisten, müssen über die komplette Streckenlänge in regelmäßigen Abständen die Verkehrsdaten erfasst werden. Dazu zählen die gefahrenen Geschwindigkeiten, die Verkehrsdichte und der Verkehrsfluss. Die Erfassung kann über die üblichen Sensoren erfolgen, also Induktionsschleifen, Kamerasensoren, Radarsensoren oder ggf. auch Infrarotsensoren. Die Daten werden in die Verkehrsleitzentrale übermittelt und dort automatisiert analysiert und darauf aufbauend die geeigneten Maßnahmen zur Streckenbeeinflussung und Preisgestaltung ergriffen.

Verkehrsbeeinflussungsanlagen

Nicht zwingend erforderlich, aber in der Praxis oft in Kombination verwendet, ist der Einsatz von dynamischen Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA). Dadurch kann der Verkehr sowohl auf der HOT-Lane, als auch auf den regulären Fahrstreifen gesteuert und homogenisiert werden, um ein möglichst effizientes Gesamtsystem zu erhalten. Durch die situative Anordnung von Überholverböten oder Geschwindigkeitsbegrenzungen kann der Verkehrsfluss auch in Zeiten hoher Belastungen aufrechterhalten werden.

Dynamische VBA sind ein Standard-Element der Verkehrssteuerung auf deutschen Autobahnen und kommen flächendeckend zum Einsatz. Durch die fahstreifengenaue Ansteuerung können die einzelnen Fahrstreifen auch gezielt angesteuert werden. In der Praxis bieten sich zudem Synergien, da die Traggerüste auch für weitere Sensoren verwendet werden können.

5.4 Kosten und Amortisierung

Die Kosten einer HOT-Lane sind für jedes Projekt unterschiedlich. Sie hängen davon ab, welche Grundlagen bereits vorhanden sind, welche Ausstattungsmerkmale gewählt wurden und wie der Betrieb vonstattengeht. Die Kosten lassen sich dabei in die Gruppen Investitionskosten zur Neuerrichtung der Anlage, Betriebskosten sowie Wartungs- und Unterhaltskosten unterteilen. Zudem fallen Kosten für Planung und Verwaltung der HOT-Lane an, die jedoch nur global für das Projekt angegeben werden können.

Ebenso wie die Kosten sind auch die Einnahmen einer Managed Lane individuell von den Projekten abhängig. Zentrale Elemente sind die Verkehrsmenge und das übergeordnete Ziel der HOT-Lane, das das Preisregime und die Rahmenbedingungen massiv beeinflusst.

Um einen groben Überblick über die möglichen Kosten einer HOT-Lane zu gewinnen, wird im Folgenden für den synthetischen Streckenzug aus Kapitel 4 eine Bepreisung der einzelnen Kostenträger vorgenommen. Dabei wird der Kostenstand zum 01.01.2023 verwendet und folgende Annahmen getroffen:

- Alle rechtlichen und verwaltungstechnischen Rahmenbedingungen zur Implementierung einer HOT-Lane sind vorhanden und rechtskräftig.
- Alle hier angenommenen Systeme sind vorhanden und funktionsfähig sowie zur Anwendung zugelassen.
- Es sind bereits Strom- und Datenleitungen entlang der Strecke vorhanden und müssen nicht mehr erstellt werden.
- Die aktuellen Kosten für die Nutzung der HOT-Lane werden in die Vorwegweisung integriert.
- Die On-Board-Unit der Fahrzeuge basiert auf den Systemen von Toll Collect, so dass hier keine Kosten für die Entwicklung eines solchen Systems angesetzt werden. Ebenso werden die Kosten für die Anschaffung der On-Board-Units nicht berücksichtigt.
- Die Markierung erfolgt im unterbrochenen Doppelstrich, ergänzt durch Markierungsnägel

Unter Berücksichtigung dieser Annahmen ergibt sich folgendes vereinfachtes Leistungsverzeichnis mit Brutto-Preisen:

Tabelle 12: Kosten pro Kostengruppe

Pos.	Titel	Menge	EP [€/x]	Summe [€]
1	Markierung [lfm]	18.000	25	450.000
2	Markierungsnagel [Stk.]	36.000	10	360.000
3	dynamische VBA [Stk.]	6	500.000	3.000.000
4	Vorwegweisung [Stk.]	10	375.000	3.750.000
5	Sensoren Induktion [Stk.]	15	15.000	225.000
6	Sensoren Radar [Stk.]	10	10.000	100.000
7	Kontrolle Fehlnutzung	5	10.000	50.000
8	Betrieb und Unterhalt [per km*a]	18	10.000	180.000

In Summe belaufen sich die Investitionskosten für den synthetischen Streckenzug damit auf rund 7,9 Mio. € und die jährlichen Kosten für Betrieb und Unterhalt auf rund 180.000 €.

Neben den entstehenden Kosten ist durch die HOT-Lane aber auch mit Einnahmen zu rechnen. Diese hängen stark vom gewählten Preisregime, der vorhandenen Verkehrsbelastung und dem Modal Split ab. Geht man, wie in dieser Dissertation geschehen, von einer Verkehrsbelastung von 5.400 Kfz/h in der Spitzenstunde oder einem DtV von 93.900 Kfz/d aus, so ergeben sich unter einem durchschnittlichen angenommenen Preis von

0,5 €/km und den in Kapitel 4.2 hinterlegten Formeln folgende Eingangsparameter. Der Anteil der HOT-Fahrzeuge am Modal Split beträgt 9,8 % und die durchschnittliche Fahrtstrecke auf der HOT-Lane beträgt gemäß den oben dargestellten Auswertungen 12,4 km. Damit ergeben sich in der Spitzenstunde Einnahmen von 3.180 €/h. Da die Verkehrsbelastung in der Spitzenstunde deutlich höher ist als durchschnittlich über den Tag, können diese Einnahmen nicht pauschal extrapoliert werden. Wie vorab beschrieben, hat die Verkehrsstärke und damit verbunden die Reisezeit einen erheblichen Einfluss auf die Wahl des Verkehrsmittels. In der Näherung geht diese Arbeit daher im Folgenden von folgender Verteilung aus.

Tabelle 13: Einnahmen pro Tag

Uhrzeit	Auslastung HOT im Vergleich zur Spitzenstunde	Dauer [h]	Einnahmen [€]
06.00 - 07.00	50 %	1	1.590
07.00 - 09.00	100 %	2	3.180
09.00 - 10.00	75 %	1	2.385
10.00 - 16.00	50 %	6	1.590
16.00 - 19.00	75 %	3	2.385
19.00 - 20.00	25 %	1	795
20.00 - 06.00	0 %	10	0
			11.925

Damit lassen sich pro Tag Einnahmen von rund 12.000 € generieren, wobei dieser Betrag sehr stark vom gewählten Preisregime abhängt. Geht man davon aus, dass ein Jahr 250 Arbeitstage hat und 115 Wochenend- und Feiertage und an Feiertagen die Nachfrage etwa halb so groß ist wie an Werktagen, so können pro Jahr etwa 3.667.000 € an Einnahmen generiert werden. Unter diesen sehr groben Annahmen lassen sich die Investitionskosten innerhalb von 3 Jahren amortisieren. In der Praxis hat sich in der Vergangenheit jedoch regelmäßig gezeigt, dass die prognostizierten Einnahmen nicht zu den tatsächlichen Einnahmen gepasst haben. Meist wurden die Einnahmen deutlich überschätzt, wie auch in Abbildung 112 zu sehen ist. Die prognostizierten Einnahmen sind daher mit Vorsicht zu behandeln, insbesondere, da HOT-Lanes bislang noch keine Anwendung in Deutschland finden und damit auch keine Erfahrungswerte vorliegen.

Early traffic models dramatically overestimated toll revenue on the SR-167 HOT lanes.

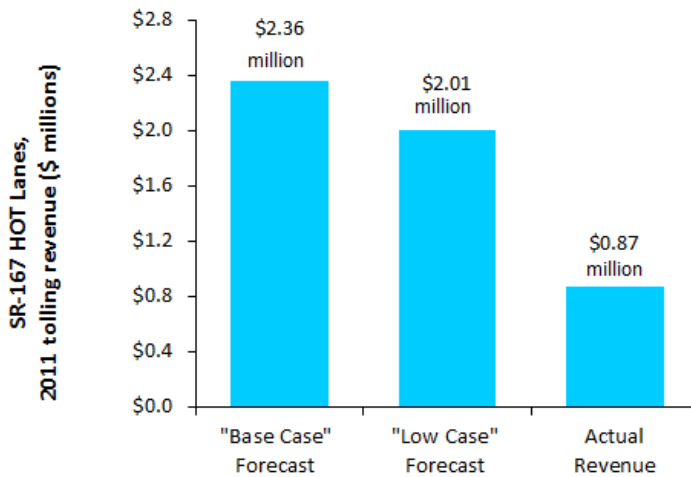


Abbildung 112: Prognostizierte und reale Einnahmen HOT-Lane (Zachary Howard 2012)

5.5 Nutzung und Anordnung

Ein privilegierter Fahrstreifen auf der Autobahn weckt Begehrlichkeiten bei vielen potenziellen Nutzergruppen. Dabei kann es sich um bestimmte Antriebe wie E-Motoren, bestimmte Berufsgruppen oder Mobilitätsformen wie Fahrgemeinschaften handeln. In der Praxis wird dringend empfohlen, den Kreis der kostenfreien Nutzer streng zu limitieren, um die gewünschte Steuerungswirkung zu erreichen. Hierzu müssen, wie bereits in Kapitel 5.1 erläutert, vorab klar die Ziele einer Managed Lane, und hier im Speziellen einer HOT-Lane, definiert werden.

Da die HOT-Lane eine Weiterentwicklung der HOV-Lanes sind, bieten sie sich vornehmlich an, um den Anteil von Fahrgemeinschaften zu erhöhen und damit den Besetzungsgrad pro PKW zu steigern. Deswegen ist die klare Handlungsempfehlung, die sich aus dieser Dissertation ableiten lässt, dass als privilegierte Nutzergruppen auf der HOT-Lane ÖPNV-Fahrzeuge und Fahrgemeinschaften zugelassen werden. Die danach vorhandenen freien Kapazitäten sollten allen Verkehrsteilnehmern gegen Gebühr zur Verfügung stellen. Von einer Privilegierung von Elektro-Fahrzeugen oder sogar Hybrid-Fahrzeugen wird dringend abgeraten, da der Anteil von E-Fahrzeugen für das Jahr 2030 bereits mit rund 25 % prognostiziert wird (Statista 2023d) und damit eine Lenkungswirkung hin zu einem höheren Besetzungsgrad verpuffen würde. Eine Bevorzugung bestimmter Berufsgruppen, wie Pflegepersonal, ist aus sozialer Sicht und aus Akzeptanzgründen als schwierig einzustufen und sollte daher vermieden werden.

Bezüglich der Anordnung der HOT-Lane bieten sich grundsätzlich vier verschiedene Möglichkeiten, die im Folgenden (Abbildung 113: Mögliche Anordnung HOT-Lane (Eigene Darstellung, Foto (Deutscher Verkehrssicherheitsrat 2023))Abbildung 113 – Abbildung 116) dargestellt werden. Zunächst muss unterschieden werden, ob für die HOT-Lane eine Kapazitätserweiterung der Fahrbahn vorgesehen werden soll, oder ob die Anzahl der regulären Fahrstreifen reduziert wird. In Abbildung 114 ist die Anordnung der HOT-Lane auf dem Seitenstreifen und in Abbildung 116 auf einem separaten Fahrstreifen neben der Hauptfahrbahn dargestellt. Die Anzahl der regulären Fahrstreifen bleibt in diesen beiden Fällen unverändert, hier wird die Kapazität also erweitert. In Abbildung 113 die Anordnung auf dem linken sowie in Abbildung 115 auf dem rechten Fahrstreifen abgebildet. Hier entfällt jeweils ein regulärer Fahrstreifen, mit entsprechenden Auswirkungen auf die Kapazität.



Abbildung 113: Mögliche Anordnung HOT-Lane (Eigene Darstellung, Foto (Deutscher Verkehrssicherheitsrat 2023))



Abbildung 114: Mögliche Anordnung HOT-Lane (Eigene Darstellung, Foto (Deutscher Verkehrssicherheitsrat 2023))



Abbildung 115: Mögliche Anordnung HOT-Lane (Eigene Darstellung, Foto (Deutscher Verkehrssicherheitsrat 2023))



Abbildung 116: Mögliche Anordnung HOT-Lane (Eigene Darstellung, Foto (Deutscher Verkehrssicherheitsrat 2023))

Welche Art der Anordnung für eine HOT-Lane gewählt wird, hängt immer vom Einzelfall und den jeweiligen Rahmenbedingungen ab. Hierbei spielen Themen wie Verkehrsbelastung und Ziele der Maßnahme eine Rolle. Vor dem Hintergrund der Diskussionen über Managed Lanes in Deutschland als eine effizientere Nutzung von bestehendem Straßenraum, ist der Einsatz von kapazitätserweiternden HOT-Lanes zunächst weniger wahrscheinlich. Betrachtet man die bislang weltweit realisierten HOT-Lanes, so dominieren die linksliegenden Fahrstreifen. Der Vorteil der linksliegenden HOT-Lane ist, dass die privilegierten Fahrzeuge dort ungestört fahren können, ohne durch verflechtende Fahrzeuge gestört zu werden. Dies bedingt allerdings, dass diese Fahrzeuge ihrerseits selbst verflechten müssen, wenn sie auf die HOT-Lane oder von ihr abfahren wollen. Diese Vorteile haben sich auch im Rahmen des Projekts TEMPUS (TEMPUS 2023) bestätigt, bei dem in einem Arbeitspaket vom Autor dieser Dissertation Simulationen zur Anordnung von Managed Lanes auf Autobahn durchgeführt wurden. Aus rechtlichen Gründen zur Veröffentlichung muss für Details an dieser Stelle auf den Projektbericht verwiesen werden. Insgesamt betrachtet wird die Anordnung der Managed Lane auf dem linken Fahrstreifen empfohlen, um einer potenziellen, auch unbeabsichtigten Fehlnutzung entgegenzuwirken sowie um einen möglichst ungestörten Verkehrsfluss auf der Managed Lane zu erhalten.

6. Chancen und Ausblick

Zum Abschluss werden in diesem Kapitel nochmals die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst sowie ein Ausblick auf nächste Schritte und den weiteren Forschungsbedarf gegeben. Die zentralen Erkenntnisse der Arbeit werden in Abbildung 117 zusammengefasst.

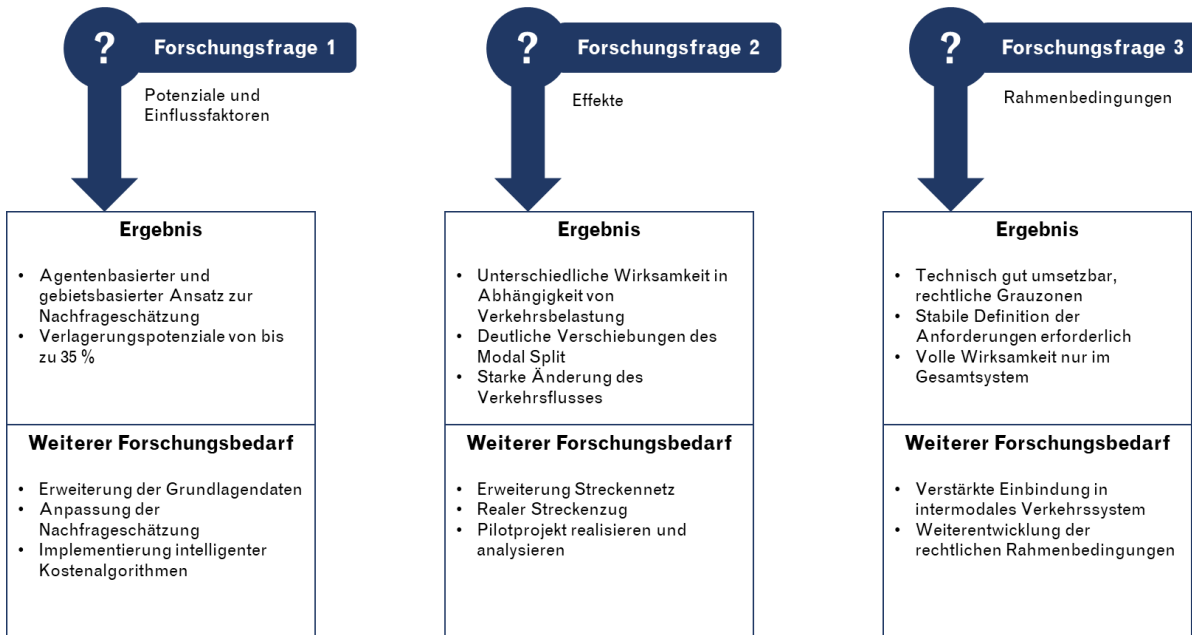


Abbildung 117: Antworten auf Forschungsfragen

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Diese Dissertation bietet einen Einblick in die Chancen und Potenziale, aber auch in die Grenzen von HOT-Lanes in Deutschland. Möchte man die Ergebnisse kurz und populärwissenschaftlich zusammenfassen, so sind HOT-Lanes kein Allheilmittel für die Probleme im deutschen Fernstraßennetz, aber ein wertvolles Puzzlestück in einem immer komplexer werdenden Verkehrssystem.

Um in der Zusammenfassung die angemessene Tiefe nach der oben genannten, stark vereinfachten Schlagzeile zu erhalten, bietet es sich zunächst an, nochmals einen Blick auf die aufgeworfenen Forschungsfragen und die Antworten dazu zu werfen.

1. Welche Potenziale und Einflussfaktoren gibt es für die Nutzung von HOT-Lanes in Deutschland?

Die Potenziale einer HOT-Lane sind stark von den äußeren Rahmenbedingungen abhängig, wie der Verkehrsstärke im System, der Anzahl der Fahrstreifen oder der zurückgelegten Strecke im Projektumgriff, und von inneren Einflussgrößen, wie dem Preisregime oder den

politischen oder verwaltungsrechtlichen Zielgrößen der HOT-Lane. Die genauen Zahlenwerte der einzelnen Szenarien lassen sich in Kapitel 4.5 nachlesen. Kurz zusammengefasst, verlagert sich umso mehr Verkehr in Fahrgemeinschaften oder den ÖPNV, je größer die Reisezeitgewinne sind. Dabei schwanken die maximalen potenziellen Reisezeitgewinne auf der HOT-Lane bei Ausnutzung der kompletten Projektlänge, je nach Verkehrsbelastung, zwischen 4 Minuten und 16 Minuten. Dadurch kann der Anteil des ÖPNV auf bis zu 35 % erhöht werden.

Im Rahmen der Datenanalyse konnten sechs Einflussfaktoren auf die Nachfrage und Nutzung einer HOT-Lane identifiziert werden, wie in Kapitel 3.3 dargelegt wird. Dabei handelt es sich um Pendeldistanz, Kosten, Reisezeitgewinne, Einkommen, Geschlecht und Alter, wobei die Einflussstärke bei den drei erstgenannten deutlich höher ist als bei den drei letztgenannten. Die Einflussfaktoren bilden die Basis für die Formulierung der Nachfrageermittlung, wobei für die agentenbasierte Nachfrageermittlung alle sechs Eingangsgrößen berücksichtigt werden, während für den gebietsbasierten Ansatz eine vereinfachte Abschätzung mit den drei stärksten Faktoren erfolgt. Die Abweichung zwischen beiden Ansätzen liegt nach den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse nicht über 5 %.

Insgesamt bieten HOT-Lanes das Potenzial, Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl und den Verkehrsfluss zu nehmen. Damit einhergehend ergeben sich auch Umweltwirkungen und eine potenzielle Einnahmequelle für die Finanzierung von Infrastrukturprojekten. Für einen optimalen Projekterfolg ist es von großer Bedeutung, dass jedes Projekt individuell betrachtet und auf die jeweiligen Ziele und Besonderheiten hin angepasst wird. Dabei wird empfohlen, die in Kapitel 5 aufgezeigten Anwendungsgrenzen und Rahmenbedingungen zu achten, die in Abbildung 118 nochmals im Überblick dargestellt sind. Es ist wichtig, die Einflussfaktoren ganzheitlich zu sehen und nicht einzelne Elemente isoliert zu betrachten, da direkte Abhängigkeiten bestehen.

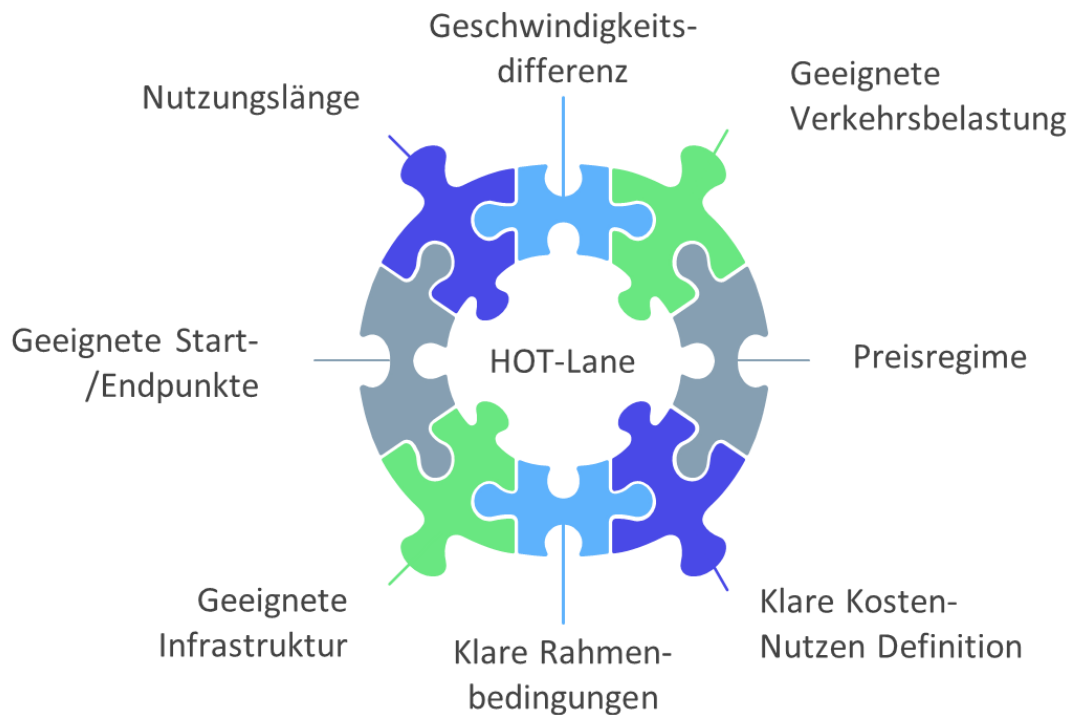


Abbildung 118: Einflussfaktoren HOT-Lane

2. Welche Effekte ergeben sich aus der Implementierung von HOT-Lanes in Deutschland?

HOT-Lanes wirken in alle Bereiche hinein, die mit dem Verkehr in Verbindung stehen. Die konkreten Effekte sind stets projektspezifisch und hängen von den Rahmenbedingungen der Maßnahme ab.

Die zumeist gravierendste Auswirkung der HOT-Lane ist ein substanzieller Kapazitätsverlust auf den regulären Fahrstreifen, der beispielsweise bei einem 3-streifigen Querschnitt 33 % beträgt. Dies hat in der Regel gravierende Folgen für die Leichtigkeit und in der Folge auch für die Sicherheit des Verkehrs. Die Verschlechterung der Verkehrsqualität auf den regulären Fahrstreifen ist teilweise auch systembedingt gewollt, darf jedoch nie zu verkehrsgefährdenden Zuständen auf den regulären Fahrstreifen führen. Insgesamt wird sich für die meisten Verkehrsteilnehmer auf den regulären Fahrstreifen die Reisezeit verlängern, wie in Kapitel 4.5 gezeigt wurde. In bestimmten Fällen kann es durch die Verlagerungswirkung auf den ÖPNV und in Teilen auf Fahrgemeinschaften auch zu einer Verbesserung im Gesamtsystem kommen, wenn die Gesamtzahl der Fahrzeuge reduziert wird. Allgemein zeigt sich, dass die Varianz der Reisezeiten in den regulären Fahrstreifen durch eine HOT-Lane deutlich ansteigt, während sie bei den Nutzern der HOT-Lane abnimmt.

Die beschriebenen Änderungen im Verkehrsfluss sowie bei der Verkehrsverlagerung führen direkt zu Abweichungen bei den Emissionen, die in Kapitel 4.7 vorgestellt wurden. Durch

unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile können hier die Emissionen in ihrer Gesamtmenge sogar steigen.

Insgesamt zeigt sich, dass Reisezeitverluste und höhere Kosten im regulären Verkehr zu einer Attraktivitätssteigerung des ÖPNV und von Fahrgemeinschaften führen, die ihrerseits jedoch auch einen entsprechenden Standard erreichen müssen, um die Nachfrage aufnehmen zu können.

Nicht vernachlässigt werden dürfen sozio-ökonomische Effekte, die sich aus HOT-Lanes ergeben können. Werden solche Projekte als sozial ungerecht empfunden, leidet die Akzeptanz der Maßnahme. Dies kann bis hin zu einer kompletten Ablehnung und Rücknahme des Projekts gehen. Zudem besteht die Gefahr, dass bestimmte Verkehrsströme auf andere Strecken verlagert werden und für zusätzliche Belastungen in Wohngebieten führen.

Die Geschwindigkeitsprofile einer HOT-Lane entsprechen grob denen eines linken Fahrstreifens auf einer 3-spurigen Autobahn. Dies bietet grundsätzlich Vorteile dahin gehend, dass eine gewisse Entflechtung bestimmter Geschwindigkeitsniveaus erfolgt, wobei sich allerdings Überholvorgänge in der HOT-Lane schwierig gestalten und auch in den regulären Fahrstreifen weiterhin Fahrzeuge mit höherer Wunschgeschwindigkeit fahren. Hier wäre in weiteren Forschungen zu prüfen, inwieweit (dynamische) Geschwindigkeitsbegrenzungen helfen, die Verkehrssicherheit zu erhöhen.

Durch die Nutzung der HOT-Lane entsteht für die Straßenbaulastträger eine potenzielle Einnahmequelle, der zunächst jedoch Investitions- und Betriebskosten gegenüberstehen, die nicht vernachlässigt werden dürfen. Dennoch ist davon auszugehen, dass sich die Investitionskosten binnen weniger Jahr amortisieren.

3. Welche Rahmenbedingungen müssen geschaffen werden, um den Einsatz von HOT-Lanes in Deutschland zu ermöglichen?

Bislang ist die Nutzung von deutschen Fernstraßen für den Personenverkehr kostenfrei und nur für den Schwerverkehr mit einer Mautgebühr verbunden. Es gibt damit aktuell nur einen groben rechtlichen Rahmen, der den Personenverkehr bislang nicht umfasst. Es sind somit im Bereich der rechtlichen Rahmenbedingungen bei Gesetzen, Verordnungen und ähnlichem die notwendigen Anpassungen vorzunehmen, um eine Implementierung von HOT-Lanes zu ermöglichen. Die Rechtssicherheit hat oberste Priorität, um einen dauerhaften Betrieb sicherzustellen. Hierzu muss die Möglichkeit geschaffen werden, Mautgebühren auf HOT-Lanes zu erheben und einzutreiben. Zudem muss die haushälterische Verwendung der eingenommenen Gelder geklärt sein. Eng damit verwandt ist das Themengebiet des Datenschutzes, der entsprechender Anpassungen bedarf, um die HOT-Lane mit ihren Erfassungssystemen rechtlich zu legitimieren. Zudem muss eine klare Regelung sowie Abstimmung zwischen Bundes- und Landesgesetzgebung vorhanden sein, so dass in ganz Deutschland einheitliche Regelungen zu diesem Themengebiet vorliegen.

Daneben muss in Regelungen festgelegt werden, welche technische Infrastruktur zu schaffen ist und diese dann realisiert werden, indem unter anderem Nothaltebuchten an HOT-Lanes errichtet werden oder allgemein die notwendige Ausstattung zur Detektion und Identifikation der Fahrzeuge auf der HOT-Lane vorgerüstet wird. Zudem müssen die notwendige Beschilderung erstellt und die Verkehrsleitzentralen mit der notwendigen Technik zur dynamischen Steuerung aufgerüstet werden. Außerdem müssen die Mitarbeiter durch Schulungen mit den Systemen und den Rahmenbedingungen vertraut gemacht werden. Entsprechendes Fachwissen muss auch in den Planungsbehörden und Ingenieurbüros aufgebaut werden. Auch im Bereich Planung und Abwicklung einer HOT-Lane spielt das Themengebiet von Datenschutz und Datensicherheit eine große Rolle. Hier werden sensible Daten erhoben und teilweise mit Kreditkarten oder anderen Zahlungsmöglichkeiten hinterlegt. Dies gilt es bestmöglich zu schützen.

Da, wie bereits mehrfach erwähnt, die Nutzung von Fernstraßen in Deutschland aktuell gebührenfrei für PKW ist, muss die Einführung von HOT-Lanes durch eine koordinierte Öffentlichkeitsarbeit flankiert werden, um in der Bevölkerung ein positives Bewusstsein für die Projekte zu schaffen. Eine öffentliche Wahrnehmung als „Reichenspur“, wie in Kapitel 5 beschrieben, stellt eine der zentralen Gefahren für den Projekterfolg dar.

Innerhalb von Politik und Verwaltung muss vor Beginn einer solchen Maßnahme klar geregelt sein, was die Ziele des Projekts sind und welche Kosten dafür in Kauf genommen werden. Wie in Kapitel 5 dargestellt, gibt es bei der Implementierung einer HOT-Lane Profiteure und Verlierer. Hier muss klar und standhaft das Ziel der Maßnahme aufgezeigt und im Zweifel auch gegen Widerstand verteidigt werden. Die zu erwartenden Einnahmen müssen einem klaren Titel im Haushalt zugewiesen sein und dürfen kein Gegenstand politischer Interessen werden. Durch eine klare Benennung der Ziele können die Parameter HOT-Lane entsprechend eingestellt werden, damit die Maßnahme ein ganzheitlicher Erfolg wird.

Übergeordnet müssen für eine HOT-Lane auch die indirekt betroffenen Verkehrsträger berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass ein attraktiver und leistungsfähiger ÖPNV zur Aufnahme wechselwilliger Pendler zur Verfügung steht und an geeigneten Stellen und in ausreichendem Umfang Pendlerparkplätze zur Verfügung stehen, an denen sich Fahrgemeinschaften bilden und wieder auflösen können, ohne durch übermäßig lange Hol- und Bring-Fahrten die Attraktivität der Fahrgemeinschaften wieder zu schmälern.

6.2 Ausblick und nächste Schritte

Der Mobilitätssektor in Deutschland ist im Wandel. Angetrieben von hohen Verkehrsbelastungen, vor allem im Bereich der Ballungszentren, einer schwierigen Finanzierungslage für Infrastrukturprojekte und einem überaus kritischen Zeitgeist bezüglich aller Mobilität und Bau betreffenden Themen, entwickeln sich neue Verkehrskonzepte und Lösungswege. Kernanliegen ist dabei häufig eine effizientere Nutzung bestehender Verkehrswege und eine mögliche Förderung von als nachhaltiger eingestuftem Verkehrsmittel.

Dabei bieten auch die fortschreitende Digitalisierung und eine leistungsfähigere IT-Infrastruktur ständig neue Möglichkeiten. In Deutschland wurden in den vergangenen Jahren unter anderem Projekte der temporären Seitenstreifenfreigabe umgesetzt, die automatisiert gesteuert und überwacht werden. Der Operator in der Verkehrsleitzentrale hat hier nur noch eine überwachende Funktion. Und auch andere Bausteine der Managed Lanes haben bereits den Sprung in die Realisierung im deutschen Straßennetz geschafft, wie die dynamischen Verkehrsbeeinflussungsanlagen oder vor allem in Nordrhein-Westfalen die Zuflusdosierung. Bislang wurde in Deutschland noch kein HOT-Projekt umgesetzt und auch bei den HOV-Lanes gibt es derzeit auf Autobahnen kein laufendes Projekt. Doch auch hier gibt es Bewegung. Im Rahmen der IAA 2021 wurde mit der „Blue Lane“ erstmals ein Pilotprojekt gestartet, bei dem Fahrgemeinschaften, dem ÖPNV sowie emissionsfreien Fahrzeugen ein exklusiver Fahrstreifen zur Verfügung gestellt wurde. Nach einer Pause zur Evaluierung und Weiterentwicklung während der IAA 2023 soll die Blue Lane 2025 in optimierter Form wieder in München Teil des Mobilitätskonzeptes der IAA werden. Es dürfte nur eine Frage der Zeit sein, bis auch die HOT-Lanes mit ersten Pilotprojekten in Deutschland getestet werden.

Auch wenn diese Dissertation versucht einen möglichst umfassenden Einblick in die Welt der Managed Lanes im Allgemeinen und in die HOT-Lanes im Besonderen zu geben, so kann sie das Thema doch nicht allumfassend behandeln. In den nächsten Schritten sollte zunächst anhand weiterer Datenerhebungen und Umfragen das Fundament der Nachfrageermittlung erweitert werden. Die bisherige Umfrage ist zwar in weiten Teilen repräsentativ für die deutsche Bevölkerung, speist sich aber hauptsächlich aus süddeutschen Teilnehmern. Hier könnte eine deutschlandweite Kampagne noch leicht geänderte Daten und vielleicht auch regionale Unterschiede bei der Mobilität zeigen. Dadurch könnte es zu einer leichten Verschiebung der Parameter in den Formeln kommen.

Bislang wurden die Formeln nur an einem synthetischen Streckenzug getestet, um eine möglichst gute Übertragbarkeit auf unterschiedliche Projekte zu gewährleisten. Hier sind in der Zukunft zwei Schritte zu gehen. Zum einen sollte, zumindest in der Simulation, eine Implementierung in einen realen Streckenzug erfolgen. Zum anderen sollte aus dem simulierten Streckenzug ein komplettes Streckennetz werden, um intensiver Auswirkungen auf benachbarte Verkehrswege zu testen.

Auch wenn bereits einige Algorithmen zur dynamischen Steuerung und Preisgestaltung von HOT-Lanes gibt, so sind diese bislang nicht auf den deutschen Straßenraum hin optimiert. Hier werden in Zukunft noch Anpassungen oder neue Systeme erforderlich sein, um die gewünschte Wirkmächtigkeit entfalten zu können. Wichtig wird dabei sein, ein System zu schaffen, dass mit geringem Aufwand auf die jeweiligen Projekte hin angepasst werden kann, in Summe aber als übertragbares Basis-System wirkt.

Die neu gefundenen Algorithmen müssen ihrerseits wieder in die Verkehrssimulationen zurückgespielt werden, damit die konkreten Auswirkungen für jedes Projekt dargestellt werden können. Hier werden vermutlich auch einige Iterationen notwendig werden.

Insgesamt wird es darum gehen, die HOT-Lanes in ein intermodales Verkehrssystem zu integrieren. Hierzu zählen dann auch Werkzeuge, die auf Basis intelligenter Wegeketten eine optimale Route mit gegebenenfalls Verkehrsmittelwechseln empfehlen. Die Grundlage bilden hierbei individuelle Vorlieben oder Vorgaben hinsichtlich Reisezeit, Reisekosten oder anderen Rahmenbedingungen der Pendler sowie Streckenbelastung und Emissionssteuerung auf übergeordneter Ebene.

Perspektivisch muss das Ziel sein, ein Testfeld oder ein Pilotprojekt zu schaffen, damit der Übergang von der Theorie in die Praxis gelingt. Gelingt es, ein erfolgreiches erstes Projekt zu realisieren, können sich andere Projekte daran orientieren und eine gewisse Dynamik für weitere Maßnahmen erzeugen. Zudem kann das System weiter analysiert und optimiert werden, da bestimmte Effekte erst in der Praxis auftreten und in keiner Simulation darstellbar sind.

„Aber das soll in einer anderen Geschichte erzählt werden.“ (Ende 1979)

Danksagung

Die Dissertation ist eine selbstständige Arbeit und doch ist man währenddessen nie allein. Ich möchte an dieser Stelle allen danken, die mich durch meine Promotion begleitet haben.

Mein Dank gilt zunächst dem Bayerischen Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, das durch die Kooperation mit dem Lehrstuhl für Verkehrstechnik und meine Abordnung diese Arbeit erst möglich gemacht hat. Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Klaus Bogenberger, dafür mich in sein wissenschaftliches Team aufzunehmen, für die Chance zu promovieren und letztendlich für seine Betreuung, die mir alle Freiheiten ließ. Vielen Dank auch an Prof. Allister Loder für die freundliche und unkomplizierte Übernahme des Zweitgutachtens.

Ein herzliches Dankeschön gilt Prof. Bernd Kaltenhäuser, ohne dessen Kenntnisse vor allem im Bereich der Statistik viele Ideen nur Ideen geblieben wären. Vielen Dank auch für die gemeinsamen Paper und Veröffentlichungen.

Vielen Dank an Matthias Spangler, Lisa Kessler und Antonios Tsakareostos vom Lehrstuhl für Verkehrstechnik sowie Jochen Eid von der Autobahn GmbH des Bundes für ihre wertvollen Hinweise und die fruchtbaren Diskussionen, die immer zu neuen Erkenntnissen für die Arbeit geführt haben.

Mein Dank geht auch an das komplette Team des Lehrstuhls für Verkehrstechnik für dreieinhalb spannende Jahre mit vielen neuen Erkenntnissen.

Der größte Dank gebührt aber meiner Familie. Insbesondere meinen Eltern sowie meiner Frau und meinen Kindern. Herzlichen Dank für eure Unterstützung und Motivation sowie eure Geduld. Ohne euch wäre vieles in den letzten Jahren nicht möglich gewesen.

Veröffentlichungen

Im Rahmen der Arbeiten an dieser Dissertation sind folgende durch peer review überprüfte Paper und Konferenzbeiträge entstanden. Die Veröffentlichungen werden teilweise oder vollständig in dieser Arbeit verwendet. Dies ist an den jeweiligen Stellen gekennzeichnet, zudem werden im Folgenden noch die jeweiligen Kapitel zu den Veröffentlichungen genannt.

- (Schönhofer und Bogenberger 2022) im Rahmen der TRB 2022
 - o Kapitel 2.5, Kapitel 2.6, Kapitel 2.7
- (Schönhofer et al. 2023a) im Rahmen der TRB 2023
 - o Kapitel 3.1
- (Schönhofer et al. 2023b) im Rahmen der ISFO 2023
 - o Kapitel 3.3, Kapitel 4.2
- (Schönhofer et al. 2024) im Rahmen der TRB 2024
 - o Kapitel 4.4, Kapitel 4.5

Abkürzungsverzeichnis

AD	Autobahndreieck
AS	Anschlussstelle
AV	Automated vehicle
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
DSGVO	Datenschutz-Grundverordnung
EP	Einheitspreis
FHWA	Federal Highway Administration
GPL	General Purpose Lane
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
HOT	High-occupancy toll
HOV	High-occupancy vehicle
IAA	Internationale Automobilausstellung
IDA	Incident Detection Algorithms
ISFO	International Symposium on Freeway and Tollway Operations
ITS	Intelligent Transportation Systems
LSA	Lichtsignalanlage
MLM	Maximum Likelihood Methode
MNLR	Multinomiale logistische Regression
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
QSV	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs
RCT	Rational Choice Theorie
SGM - SEM	Strukturgleichungsmodellierung -structural equation modeling

SIT	Social Identity Theory
SOV	Single occupancy vehicle
StVG	Straßenverkehrsgesetz
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung
TOC	Theory of Constraints
TPB	Theory of Planned Behavior
TRB	Transportation Research Board
TSF	Temporäre Seitenstreifenfreigabe
TTI	Travel Time Index
VBA	Verkehrsbeeinflussungsanlage
VOR	Value of Reliability
VOT	Value of Time
VTT	Value of Travel Time
VTTS	Value of Travel Time Savings
VzKat	Verkehrszeichenkatalog

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit	7
Abbildung 2: Arten von Managed Lanes nach (Collier und Goodin 2004) und (Fitzpatrick et al. 2016)	13
Abbildung 3: Entwicklung Streckenkilometer USA (Frey 2018)	14
Abbildung 4: Streckenkilometer von Sonderfahrstreifen in den USA (Fitzpatrick et al. 2016)	15
Abbildung 5: Entwicklung mit wichtigsten Meilensteinen der Managed Lanes	16
Abbildung 6: Beschilderung HOV-Lane (Tantillo et al. 2020)	17
Abbildung 7: VZ mehrfach besetzte Fahrzeuge Deutschland (Bundesanstalt für Straßenwesen 2018)	17
Abbildung 8: Beispiel HOT-Lane (Tantillo et al. 2020)	19
Abbildung 9: System HOV-Lane (All of San Antonio 2020)	20
Abbildung 10: Beispiel HOV-Lane (Tantillo et al. 2020)	21
Abbildung 11: Reversible Lane mit verschiebbarer Mittelleitwand (Lindsay Corporation 2022)	22
Abbildung 12: Beispiel Schleuse Wechselverkehrsstreifen (Versilis Inc. 2020)	23
Abbildung 13: Beschilderung Seitenstreifenfreigabe (Deutschland und Bundesanstalt für Straßenwesen 2017; Bundesanstalt für Straßenwesen 2018)	25
Abbildung 14: Statische Seitenstreifenfreigabe (Jenior et al. 2016)	25
Abbildung 15: Schema einer LSA zur Zuflussdosierung (Wral 2013)	28
Abbildung 16: Praxisbeispiel Zuflussregelung (Straßenverkehrszentrale Baden-Württemberg 2018)	29
Abbildung 17: Beispiel dynamisch bepreister Highway (Dorries 2018)	31
Abbildung 18: Videodetektion Congestion Pricing (NETWORK DISPATCHES 2013)	32
Abbildung 19: Zielparameter von Kostenalgorithmen nach (Laval et al. 2015) und (Lombardi et al. 2021)	34
Abbildung 20: Stammbaum der IDA nach (Martin et al. 2001; Evans et al. 2020)	36
Abbildung 21: Eingangsparmeter Ramp Metering (Chaudhary et al. 2004)	37
Abbildung 22: Stammbaum Algorithmen Zuflussregelung nach (Zhang et al. 2001)	39
Abbildung 23: Auswirkungen von Fahrtstreifen für hochbesetzte Fahrzeuge	44
Abbildung 24: Auswirkungen von Wechselverkehrsstreifen	45
Abbildung 25: Auswirkungen von Seitenstreifenfreigaben	47
Abbildung 26: Auswirkungen Zuflussregelung	48
Abbildung 27: Auswirkungen dynamischer Straßennutzungsgebühren	50
Abbildung 28: Umsetzungsgrade von Managed Lanes in Europa (Schönhofer und Bogenberger 2022)	51
Abbildung 29: Altersverteilung Umfrage	59
Abbildung 30: Einkommensstruktur der Umfrageteilnehmer	60
Abbildung 31: Wohnorte (links) und Arbeitsorte (rechts) der Befragten	60
Abbildung 32: Pendeldistanz der Umfrageteilnehmer	61
Abbildung 33: Anteil an zumindest gelegentlichen Fahrgemeinschaftsnutzern	62
Abbildung 34: Bedeutung ausgewählter Attribute auf das Wahlverhalten beim Pendeln	64
Abbildung 35: Zahlungsbereitschaft in Abhängigkeit von Reisezeit und Kosten	65
Abbildung 36: Zahlungsbereitschaft in Abhängigkeit des Einkommens	66
Abbildung 37: Bedeutung Flexibilität in Abhängigkeit des Einkommens	67
Abbildung 38: Aufbau eines SGM nach (Fuchs 2011)	69
Abbildung 39: SGM zur Verkehrsmittelwahl (Schönhofer et al. 2023a)	71
Abbildung 40: Graph multinominale logistische Regression (DATAtab Team 2023)	88

Abbildung 41: Auswirkung Pendeldistanz Modal Split	94
Abbildung 42: Auswirkungen Kosten auf Modal Split	95
Abbildung 43: Auswirkung Reisezeitgewinne auf Modal Split	96
Abbildung 44: Auswirkung Einkommen auf Modal Split	97
Abbildung 45: Einfluss Geschlecht	97
Abbildung 46: Einfluss Altersklassen	98
Abbildung 47: Synthetisches Referenznetz nach HBS (FGSV 2015)	104
Abbildung 48: Synthetisches Streckennetz in Aimsun	105
Abbildung 49: Modal Split Basis-Szenario	110
Abbildung 50: Verhältnis von erwarteten Reisezeitgewinnen zu realen Reisezeitgewinnen für 0,5 €/km; Blaue Linie: optimales Verhältnis Real-Erwartet, Schwarze Linie: gemessenes Verhältnis: Real-Erwartet, gepunktet: Ausgleichskurve	113
Abbildung 51: Modal Split für Fahrten von Autobahndreieck 1 nach Autobahndreieck 6	115
Abbildung 52: Modal Split für das Gesamtnetz (gewichtet nach der gefahrenen Streckenlänge)	116
Abbildung 53: Modal Split für das Gesamtnetz für Individualverkehr (ohne ÖPNV)	117
Abbildung 54: Gesamtnetz - Reisezeiten bei unterschiedlichen Kostensätzen	118
Abbildung 55: Autobahndreieck 1 bis Autobahndreieck 6 - Reisezeiten bei unterschiedlichen Kostensätzen	119
Abbildung 56: Anteil an schnelleren (-) oder langsameren (+) Fahrzeugen verglichen mit Basis- Szenario	121
Abbildung 57: Durchschnittliche Reisezeiten bei unterschiedlichen Kostensätzen	122
Abbildung 58: Modal Split bei 120 % QSV D	123
Abbildung 59: Modal Split Szenario 120 % Gesamtnetz	125
Abbildung 60: Modal Split Szenario 120 % AD 1 bis AD 6	126
Abbildung 61: Modal Split Szenario 120 % AD 1 bis AS2	127
Abbildung 62: Durchschnittliche Reisezeit im Gesamtnetz für 120 % QSV D	128
Abbildung 63: Durchschnittliche Reisezeit AD 1 bis AD 6 für 120 % QSV D	129
Abbildung 64: Anteil an schnelleren (-) oder langsameren (+) Fahrzeugen verglichen mit Basis- Szenario 120 % QSV D	130
Abbildung 65: Minimale, Durchschnittliche und Maximale Fahrtzeit für SOV zwischen 1 und 6	131
Abbildung 66: Minimale, Durchschnittliche und Maximale Fahrtzeit für HOT zwischen 1 und 6	132
Abbildung 67: Modal Split Basis-Szenario für QSV D 80 %	134
Abbildung 68: Modal Split Gesamtnetz für 80 % QSV D	136
Abbildung 69: Modal Split AD 1 bis AD 6 für 80 % QSV D	137
Abbildung 70: Durchschnittliche Reisezeit im Gesamtnetz für 80 % QSV D	138
Abbildung 71: Durchschnittliche Reisezeit AD 1 bis AD 6 für 80 % QSV D	139
Abbildung 72: Anteil an schnelleren (-) oder langsameren (+) Fahrzeugen verglichen mit Basis- Szenario	140
Abbildung 73: Minimale, Durchschnittliche und Maximale Fahrtzeit für SOV zwischen 1 und 6	141
Abbildung 74: Minimale, Durchschnittliche und Maximale Fahrtzeit für HOV zwischen 1 und 6	141
Abbildung 75: Durchschnittliche Fahrtzeit von A nach B im jeweiligen Basis-Szenario	142
Abbildung 76: Potenzielle Reisezeitgewinne für Fahrten von A nach B	143
Abbildung 77: Anteil an Fahrzeugen, die im Vergleich zum Basis-Szenario schneller oder langsamer sind	144
Abbildung 78: Durchschnittliche Reisezeit im Gesamtnetz [min] von SOV und HOV	145
Abbildung 79: Reisezeiten [min] von SOV und HOV für Fahrten A – B	146

Abbildung 80: Reisezeit [min] von SOV und HOV für Fahrten 1 - 2	147
Abbildung 81: Überblick Entwicklung Modal Split für Fahrten von AD 1 nach AD 6.....	148
Abbildung 82: Modal Split Gesamtnetz	149
Abbildung 83: Modal Split von AD 1 nach AS 2.....	150
Abbildung 84: Überblick Kostensensitivität AD 1 nach AD 6	151
Abbildung 85: Kostensensitivität Gesamtnetz.....	152
Abbildung 86: Kostensensitivität AD 1 nach AS 2.....	153
Abbildung 87: Darstellungsformen des Fundamentaldiagramms in 2D (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2005).....	154
Abbildung 88: Allgemeines q-v-Diagramm (Wu 2000).....	155
Abbildung 89: Allgemeines k-v-Diagramm (Wu 2000).....	156
Abbildung 90: Detektorstandorte für Fundamentaldiagramme	157
Abbildung 91: Anordnung der Detektoren.....	157
Abbildung 92: q-v-Diagramme für die Managed Lane (l) und den gesamten Querschnitt (r) bei QSV D 80 % in Sektor 2 bei 0,1 €/km.....	158
Abbildung 93: q-v-Diagramme für die Managed Lane (l) und den gesamten Querschnitt (r) bei QSV D 80 % in Sektor 6 bei 0,1 €/km.....	158
Abbildung 94: k-v-Diagramm für Fahrstreifen 1 bei QSV D 80 % in Sektor 6 bei 0,1 €/km.....	159
Abbildung 95: q-v-Diagramme für die Managed Lane (l) und den gesamten Querschnitt (r) bei QSV D 100 % in Sektor 2 bei 0,5 €/km.....	160
Abbildung 96: q-v-Diagramme für die Managed Lane (l) und den gesamten Querschnitt (r) bei QSV D 100 % in Sektor 6 bei 0,5 €/km.....	160
Abbildung 97: q-v-Diagramme für die Managed Lane bei QSV D 100 % in Sektor 6 für 0,1 €/km (l), 0,5 €/km (m) und 1 €/km (r)	161
Abbildung 98: q-v-Diagramme für die Managed Lane (l) und den gesamten Querschnitt (r) bei QSV D 120 % in Sektor 2 bei 0,5 €/km.....	161
Abbildung 99: q-v-Diagramme für die Managed Lane (l) und den gesamten Querschnitt (r) bei QSV D 120 % in Sektor 6 bei 0,5 €/km.....	162
Abbildung 100: q-v-Diagramme für die Managed Lane bei QSV D 120 % in Sektor 6 für 0,1 €/km (l), 0,5 €/km (m) und 1 €/km (r)	162
Abbildung 101: Übersicht CO ₂ -Emissionen	164
Abbildung 102: CO ₂ -Emissionen bei 100 % QSV D	165
Abbildung 103: CO ₂ -Emissionen pro Fahrzeugklasse für 100 % QSV D	166
Abbildung 104: Übersicht NO _x -Emissionen	168
Abbildung 105: NO _x -Emissionen bei 100 % QSV D.....	169
Abbildung 106: Beispiel HOT-Lane als Referenz (City Observatory 2017)	180
Abbildung 107: Beschilderung Beginn Managed Lane (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 06/2006).....	181
Abbildung 108: Angabe Kosten HOT-Lane (FHWA 2020).....	181
Abbildung 109: Markierung Managed Lane (Ruch Verkehrstechnik 2023)	182
Abbildung 110: Markierung Managed Lane im Verflechtungsbereich	183
Abbildung 111: On Board Unit – Mauterfassung (Toll Collect 2023)	184
Abbildung 112: Prognostizierte und reale Einnahmen HOT-Lane (Zachary Howard 2012).....	188
Abbildung 113: Mögliche Anordnung HOT-Lane (Eigene Darstellung, Foto (Deutscher Verkehrssicherheitsrat 2023)).....	189

Abbildung 114: Mögliche Anordnung HOT-Lane (Eigene Darstellung, Foto (Deutscher Verkehrssicherheitsrat 2023))	190
Abbildung 115: Mögliche Anordnung HOT-Lane (Eigene Darstellung, Foto (Deutscher Verkehrssicherheitsrat 2023))	190
Abbildung 116: Mögliche Anordnung HOT-Lane (Eigene Darstellung, Foto (Deutscher Verkehrssicherheitsrat 2023))	191
Abbildung 117: Antworten auf Forschungsfragen	192
Abbildung 118: Einflussfaktoren HOT-Lane	194

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wirkweise Managed Lane	42
Tabelle 2: Umsetzungsgrad Managed Lanes Europa und USA Stand 2020 nach (Schönhofer und Bogenberger 2022; Eurostat 2021)	52
Tabelle 3: Einflussfaktoren Verkehrsmittelwahl (Schönhofer et al. 2023b).....	91
Tabelle 4: Regressionskoeffizienten nach SPSS-Analyse (Schönhofer et al. 2023b).....	93
Tabelle 5: Relative Quell-Ziel-Matrix	106
Tabelle 6: Absolute Quell-Ziel-Matrix für den Basisfall [Personen/h].....	107
Tabelle 7: Durchschnittliche Reisezeiten [min] Basis-Szenario	111
Tabelle 8: Reisezeitgewinne [min] für 0,5 €/km	114
Tabelle 9: Reisezeitgewinne [min] für 0,5 €/km bei Szenario 120 % QSV D.....	124
Tabelle 10: Durchschnittliche Reisezeiten [min] für QSV 80 % im Basisfall.....	133
Tabelle 11: Reisezeitgewinne [min] für 0,5 €/km bei Szenario 80 % QSV D.....	135
Tabelle 12: Kosten pro Kostengruppe.....	186
Tabelle 13: Einnahmen pro Tag.....	187

Literaturverzeichnis

- Abulibdeh, Ammar; Zaidan, Esmat (2018): Analysis of factors affecting willingness to pay for high-occupancy-toll lanes: Results from stated-preference survey of travelers. In: *Journal of Transport Geography* 66, S. 91–105. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2017.11.015.
- AdminStat (2023): Altersklassen nach GeschlechtRegion BAYERN, Alterungsindex und Durchschnittsalter der Ansässigen. Online verfügbar unter <https://ugeo.urbistat.com/AdminStat/de/de/demografia/eta/bayern/9/2>, zuletzt aktualisiert am 24.02.2023, zuletzt geprüft am 24.02.2023.
- Agresti, Alan (2008): *Categorical data analysis*. 2. ed., [repr.]. Hoboken, NJ: Wiley (Wiley-interscience).
- Ajzen, Icek (1991): The theory of planned behavior. In: *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 50 (2), S. 179–211. DOI: 10.1016/0749-5978(91)90020-T.
- All of San Antonio (2020): San Antonio HOV lanes to debut this fall. In: *All of San Antonio*, 26.07.2020. Online verfügbar unter <https://allofsa.net/2020/07/26/san-antonio-hov-lanes-to-debut-this-fall/>, zuletzt geprüft am 23.02.2022.
- Amt der Oberösterreichischen Landesregierung (2015): Dokumentation der Entwicklung der Luftgüte für NO₂. 2011-2014. Online verfügbar unter https://www.land-oberoesterreich.gv.at/Mediendateien/Formulare/Dokumente%20UWD%20Abt_US/Doku_NO2_Enns-Kristein.pdf, zuletzt geprüft am 19.10.2023.
- Arnold, E. D., JR. (1998): Ramp Metering: A Review of the Literature. Hg. v. Virginia Transportation Research Council. Virginia Transportation Research Council. Online verfügbar unter https://www.viriniadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/99-tar5.pdf, zuletzt geprüft am 23.03.2022.
- Axhausen, Kay W.; Ehreke, Ilka; Glemser, Axel; Hess, Stephane; Jödden, Christian; Nagel, Kai (2015): Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf der Basis eines Modells für modale Verlagerungen im nicht-gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung. Schlussbericht: FE-Projekt-Nr. 96.996/2011. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Online verfügbar unter <https://daten.clearingstelle-verkehr.de/277/8/Schlussbericht.pdf>, zuletzt geprüft am 24.03.2023.
- Backhaus, Klaus; Erichson, Bernd; Plinke, Wulff; Weiber, Rolf (2016): *Multivariate Analysemethoden*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Backhaus, Klaus; Erichson, Bernd; Weiber, Rolf (2015): *Fortgeschrittene Multivariate Analysemethoden*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Bamberg, Sebastian; Ajzen, Icek; Schmidt, Peter (2003): Choice of Travel Mode in the Theory of Planned Behavior: The Roles of Past Behavior, Habit, and Reasoned Action. In: *Basic and Applied Social Psychology* 25 (3), S. 175–187. DOI: 10.1207/S15324834BASP2503_01.

- Bartel, Phillip; Dahl, Alexander; Paufler-Mann, Daniela; Röhling, Wolfgang; Mann, Hans-Ulrich (2016): Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Bonn. Online verfügbar unter <https://www.bi-nordzulauf-ko.de/wp-content/uploads/2019/09/bvwp-2030-methodenhandbuch.pdf>, zuletzt geprüft am 31.03.2023.
- BASSt (2021): Reference Handbook for harmonized ITS Core Service Deployment in Europe. Bergisch Gladbach: BASSt. Online verfügbar unter https://www.its-platform.eu/wp-content/uploads/ITS-Platform/AchievementsDocuments/ReferenceHandbook/EUEIP-ReferenceHandbook_accessible.pdf, zuletzt geprüft am 22.03.2022.
- Ben-Akiva, Moshe E.; Gao, Song; Wei, Zheng; Wen, Yang (2012): A dynamic traffic assignment model for highly congested urban networks. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 24, S. 62–82. DOI: 10.1016/j.trc.2012.02.006.
- Benjamin G. Perez, Charles Fuhs, et. al (2012): Priced Managed Lane Guide. Unter Mitarbeit von Reno Giordano Colleen Gants. Hg. v. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Wahington D.C. (FHWA-HOP-13-007, DTFH61-06-D-00004). Online verfügbar unter <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop13007/fhwahop13007.pdf>, zuletzt geprüft am 04.01.2022.
- BMDV (2022): Verkehr in Zahlen 2022/2023. Online verfügbar unter https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2022-2023-pdf.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 16.11.2023.
- Bogenberger, Klaus; May, Adolf (1999): Advanced Coordinated Traffic Responsive Ramp Metering Strategies. In: *Institute of Transportation Studies, UC Berkeley, Institute of Transportation Studies, Research Reports, Working Papers, Proceedings*.
- Boltze, Manfred; Specht, Günter; Friedrich, Daniel; Figur, Andreas (2002): Grundlagen für die Beeinflussung des individuellen Verkehrsmittelwahlverhaltens durch Direktmarketing. Techn. Univ. Darmstadt. Online verfügbar unter <https://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/22550/>.
- Brandstätter, Klaus (2007): Straßenhoheit und Straßenzwang im hohen und späten Mittelalter. In: *Straßen- und Verkehrswesen im hohen und späten Mittelalter*, S. 201–228. Online verfügbar unter <https://journals.ub.uni-heidelberg.de/index.php/vuf/article/download/17798/11609>, zuletzt geprüft am 13.04.2022.
- Brock, Ditmar; Diefenbach, Heike; Junge, Matthias; Keller, Reiner; Villányi, Dirk (2009): Soziologische Paradigmen nach Talcott Parsons: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (2018): Fachthemen – Verkehrstechnik - Neue Verkehrszeichen nach der Einführung des Verkehrszeichenkatalogs 2017. Hg. v. BASSt. Bergisch Gladbach. Online verfügbar unter <https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v1-verkehrszeichen/unterseiten/Neue-Vz-nach-2017.html>, zuletzt aktualisiert am 23.02.2022, zuletzt geprüft am 23.02.2022.
- Bundesministerium der Justiz (11/2019): Gesetz über die Erhebung einer zeitbezogenen Infrastrukturabgabe für die Benutzung von Bundesfernstraßen. InfrAG. Fundstelle: <https://www.gesetze-im-internet.de/infrag/BJNR090410015.html>.

- Bundesministerium der Justiz (07/2021): Gesetz zur Bevorrechtigung des Carsharing. CsgG, vom 2022.
- Bundeszentrale für politische Bildung (2022): Einkommensgruppen. In: *Bundeszentrale für politische Bildung*, 14.01.2022. Online verfügbar unter <https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/soziale-situation-in-deutschland/61763/einkommensgruppen/>, zuletzt geprüft am 28.11.2022.
- Burris, Mark; Jha, Kartikeya; Biswas, Sayantan; Holloway, Laura; Texas A&M Transportation Institute; University of Puerto Rico (Mayaguez Campus) (2021): Comparing Pricing Mechanisms for Managed Lanes: National Institute for Congestion Reduction. Online verfügbar unter <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/56968>.
- Cacilo, Andrej; Schmidt, Sarah. Wittlinger, Philipp; et. al. (2015): HOCHAUTOMATISIERTES FAHREN AUF AUTOBAHNEN – INDUSTRIEPOLITISCHE SCHLUSSFOLGERUNGEN. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/H/hochautomatisiertes-fahren-auf-autobahnen.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D1, zuletzt geprüft am 05.08.2022.
- California Department of Transportation (2016): RAMP METERING DESIGN MANUAL. Sacramento.
- Carrion, Carlos; Levinson, David (2012): Value of travel time reliability: A review of current evidence. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46 (4), S. 720–741. DOI: 10.1016/j.tra.2012.01.003.
- Casady, Carter B.; Gómez-Ibáñez, José A.; Schwimmer, Emily: TOLL-MANAGED LANES: A SIMPLIFIED BENEFIT-COST ANALYSIS OF SEVEN US PROJECTS. Online verfügbar unter https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10107137/3/Casady_Toll%20Managed%20Lanes%20BCA_Revision%20%28Final%29.pdf, zuletzt geprüft am 04.04.2023.
- Casady, Carter B.; Gómez-Ibáñez, José A.; Schwimmer, Emily (2020): Toll-managed lanes: A simplified benefit-cost analysis of seven US projects. In: *Transport Policy* 89, S. 38–53. DOI: 10.1016/j.tranpol.2020.02.001.
- CEDR WG Traffic and Network Management (2018): Hard Shoulder Running. Fact Sheet. Unter Mitarbeit von Christian Ebner. Hg. v. CEDR. Utrecht. Online verfügbar unter <https://www.cedr.eu/docs/view/6063273e214d8-en>.
- Cerwenka, P.; Hauger, G. (2003): Infrastructure-induced Mobility. In: Raffaella Piovan, Zöldi Mihály und Maria Ancenay (Hg.): Tunézia. 0044-3670. [Budapest]: Gabo (A világ legszebb helyei). Online verfügbar unter <https://trid.trb.org/view/992607>.
- Chang, Mark; Wiegmann, John; Smith, Andrew; Claudia Bilotto (2008): A Review of HOV Lane Performance and Policy Options in the United States. Hg. v. Federal Highway Administration. Booz Allen Hamilton Inc. Wahington D.C.
- Chaudhary, Nadeem; Tian, Zongzhong; Messer, Carroll; Chu, Chi-Leung (2004): RAMP METERING ALGORITHMS AND APPROACHES FOR TEXAS. Evaluation of Ramp Metering Algorithms. Hg. v. Texas Transportation Institute.

- City Observatory (2017): City Observatory - What HOT lanes reveal about the value of travel time. Online verfügbar unter <https://cityobservatory.org/what-hot-lanes-reveal-about-the-value-of-travel-time/>, zuletzt aktualisiert am 30.01.2017, zuletzt geprüft am 08.11.2023.
- Civelek, Mustafa Emre (2018): Essentials of Structural Equation Modeling. In: *Zea Books*. DOI: 10.13014/K2SJ1HR5.
- Code de la route. Textes de loi & consultations (2022). 1. éd. 1999. Paris: Éd. Prat.
- Collier, Tina; Goodin, Ginger (2004): MANAGED LANES: A Cross-Cutting Study. FHWA; Texas A&M Transportation Institute. Online verfügbar unter https://ops.fhwa.dot.gov/freewaymgmt/publications/managed_lanes/crosscuttingstudy/final3_05.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2021.
- Conceição, Lígia; Correia, Gonçalo Homem de Almeida; Tavares, José Pedro (2020): The Reversible Lane Network Design Problem (RL-NDP) for Smart Cities with Automated Traffic. In: *Sustainability* 12 (3), S. 1226. DOI: 10.3390/su12031226.
- Congressional Budget Office (2009): Using Pricing to Reduce Traffic Congestion. Unter Mitarbeit von Douglas W. Elmendorf. Hg. v. The Congress of the United States. Congressional Budget Office. Online verfügbar unter <https://www.cbo.gov/sites/default/files/111th-congress-2009-2010/reports/03-11-congestionpricing.pdf>, zuletzt geprüft am 08.04.2022.
- Cornago, Elisabetta; Dimitropoulos, Alexandros; Oueslati, Walid (2019): EVALUATING THE IMPACT OF URBAN ROAD PRICING ON THE USE OF GREEN TRANSPORT MODES. THE CASE OF MILAN. ENVIRONMENT WORKING PAPER N° 143. Hg. v. OECD. Paris. Online verfügbar unter [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/WKP\(2019\)2&docLanguage=En](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/WKP(2019)2&docLanguage=En), zuletzt geprüft am 20.10.2022.
- Culotta, Kalle; Fang, Dr. Vincent (MacroSys); Habtemichael, Dr. Filmon (Batelle); Pape, Douglas (Batelle) (2019): Does Travel Time Reliability Matter? Hg. v. Federal Highway Administration. FHWA. Washington, D.C. Online verfügbar unter <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop19062/fhwahop19062.pdf>, zuletzt geprüft am 30.03.2023.
- Dauth, Wolfgang; Haller, Peter (2018): Berufliches Pendeln zwischen Wohn- und Arbeitsort: Klarer Trend zu längeren Pendeldistanzen. Nürnberg: Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) (IAB-Kurzbericht, 10/2018). Online verfügbar unter <https://www.econstor.eu/handle/10419/185845>.
- Davidov, Eldad (2003): Travel mode choice as a rational choice. Different aspects. Dissertation. Julius-Liebig-Universität, Giessen. Gesellschaftswissenschaften. Online verfügbar unter <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2004/1468/pdf/DavidovEldad-2004-03-12.pdf>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.
- Dehne, Max; Schupp, Jürgen (2007): Persönlichkeitsmerkmale im Sozio-ökonomischen Panel. Konzept, Umsetzung und empirische Eigenschaften. Hg. v. DIW Berlin. DIW Berlin. Berlin. Online verfügbar unter https://www.diw.de/documents/pub-likationen/73/diw_01.c.76533.de/rn26.pdf, zuletzt geprüft am 17.03.2023.

- Deighton-Smith, Rex; Small, Ken; Perkins, Stephen (2020): Decongesting our Cities. International Transport Forum Discussion Papers. Hg. v. International Transport Forum.
- Deutscher Bundestag Verwaltung - Referat PE 2 (07/2019): Aktueller Begriff Europa - PKW-Maut. Aktenzeichen: Nr. 05/19. Deutscher Bundestag.
- Deutscher Verkehrssicherheitsrat (2023): Seitenstreifen auf der Autobahn: Was ist erlaubt?, 05.01.2023. Online verfügbar unter <https://www.runtervomgas.de/ratgeber-und-service/artikeluebersicht/seitenstreifen-auf-der-autobahn-was-ist-erlaubt/>, zuletzt geprüft am 07.11.2023.
- Deutschland; Bundesanstalt für Straßenwesen (2017): VzKat. Katalog der Verkehrszeichen. Stand: Juni 2017. Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag (Verkehrsblatt-Sammlung, Nr. S 2310).
- Digman, J. M. (1990): Personality Structure: Emergence of the Five-Factor Model. In: *Annu. Rev. Psychol.* 41 (1), S. 417–440. DOI: 10.1146/annurev.ps.41.020190.002221.
- Domencich, T. A.; McFadden, D. (1975): URBAN TRAVEL DEMAND - A BEHAVIORAL ANALYSIS. Oxford: North-Holland Publishing Company Limited. Online verfügbar unter <https://trid.trb.org/view/48594>.
- Dorries, Bruce (2018): Staunton to NoVa — Driven crazy on I-81/I-66 during a Christmas family visit: Column. In: *The News Leader*, 06.01.2018. Online verfügbar unter <https://eu.newsleader.com/story/news/local/augusta-county/2018/01/05/driven-crazy-81-66-during-christmas-family-visit/1009325001/>, zuletzt geprüft am 08.04.2022.
- EarthSense (2021): Smart City Solutions Through Combined Air Pollution & Traffic Technologies. Online verfügbar unter <https://www.earthsense.co.uk/post/nevfma-combined-airquality-traffic-technologies>, zuletzt aktualisiert am 25.05.2021, zuletzt geprüft am 20.07.2023.
- ECMT (1998): Infrastructure-induced Mobility. Paris: OECD (Organisation for Economic Co-Operation & Dev; Extenza-Turpin [distributor],; Bernan Associates [distributor],; Technical Books Pty Ltd [distributor],; DA Information Services Pty Ltd [distributor],; Bernan Associates [distributor]. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6412286>.
- Ende, Michael (1979): Die unendliche Geschichte. Von A bis Z. [Nachdr.]. [S.I.]: Thienemanns.
- Europäische Union (07/2010): Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern. ITS-Richtlinie, vom 07.07.2010 53 (L_207).
- Europäisches Parlament (02/2022): Richtlinie 2022/362. 2022/362.
- European Commission. Joint Research Centre (2022): CO2 emissions of all world countries: Publications Office.
- European ITS Platform (2021): Reference Handbook for harmonized ITS Core Service Deployment in Europe. Online verfügbar unter <http://www.its-platform.eu/wp-content/uploads/ITS->

Platform/AchievementsDocuments/ReferenceHandbook/EUEIP-ReferenceHandbook_accessible.pdf, zuletzt geprüft am 19.10.2022.

Eurostat (2021): Statistics | Eurostat. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/road_if_motorwa/default/table?lang=de, zuletzt aktualisiert am 19.04.2021, zuletzt geprüft am 19.04.2021.

Evans, Jonny; Waterson, Ben; Hamilton, Andrew (2020): Evolution and Future of Urban Road Incident Detection Algorithms. In: *J. Transp. Eng., Part A: Systems* 146 (6), Artikel 03120001. DOI: 10.1061/JTEPBS.0000362.

Fahrmeir, Ludwig; Kneib, Thomas; Lang, Stefan (2009): Regression. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Fan, Yi; Chen, Jiquan; Shirkey, Gabriela; John, Ranjeet; Wu, Susie R.; Park, Hogeun; Shao, Changliang (2016): Applications of structural equation modeling (SEM) in ecological studies: an updated review. In: *Ecol Process* 5 (1), S. 1–12. DOI: 10.1186/s13717-016-0063-3.

Federal Highway Administration (2008): Managed Lanes. A primer. Hg. v. U.S. Department of Transportation. Washington, D.C. (FHWA-HOP-05-031).

FGSV (2006): Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. Köln: FGSV-Verl. (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 388).

FGSV (2015): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. HBS 2015. Ausg. 2015, Stand: 18.9.2015. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln (FGSV W1 - Wissensdokumente, FGSV 299 B).

FHWA (2008): Congestion Pricing. A Primer. Hg. v. Federal Highway Administration. Department of Transportation. Washington D.C. (FHWA-HOP-08-039). Online verfügbar unter <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08039/fhwahop08039.pdf>, zuletzt geprüft am 17.06.2022.

Fitzpatrick, Kay; Brewer, Marcus A.; Chrysler, Susan; Wood, Nick; Kuhn, Beverly; Goodin, Ginger et al. (2016): Guidelines for Implementing Managed Lanes. Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2005): Hinweise zum Fundamentaldiagramm. Grundlagen und Anwendungen. Ausg. 2005. Köln (FGSV, FGSV-385).

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (06/2006): Richtlinien für die wegweisende Beschilderung an Bundesautobahnen. RWBA, vom 2006.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012): Hinweise zum Einsatz von Steuerungsverfahren in der Verkehrsbeeinflussung. Ausg. 2012. Köln (FGSV W1 - Wissensdokumente, FGSV 304/1).

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (12/2019): Richtlinien für die Markierung von Straßen. RMS.

- Forschungs-Informations-System (2023): Pkw-Besetzungsgrad bei der privaten Autonutzung. Online verfügbar unter <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/79638/>, zuletzt aktualisiert am 27.11.2023, zuletzt geprüft am 27.11.2023.
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation; Horváth & Partners (2016): The Value of Time. Nutzerbezogene Service-Potenziale durch autonomes Fahren. Online verfügbar unter https://blog.iao.fraunhofer.de/images/blog/studie-value_of_time.pdf, zuletzt geprüft am 31.03.2023.
- Frey, H. Christopher (2018): Trends in onroad transportation energy and emissions. In: *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)* 68 (6), S. 514–563. DOI: 10.1080/10962247.2018.1454357.
- Fuchs, Andreas (2011): Methodische Aspekte linearer Strukturgleichungsmodelle. Ein Vergleich von kovarianz- und varianzbasierten Kausalanalyseverfahren. Würzburg: Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Lehrstuhl für BWL und Marketing (Research papers on marketing strategy, 2/2011). Online verfügbar unter <https://www.econstor.eu/handle/10419/44940>.
- Galit Cohen-Blankshtain; Hillel Bar-Gera; Yoram Shiftan (2020): International Transport Forum Discussion Papers: OECD (2020/09). Online verfügbar unter https://www.oecd-ilibrary.org/transport/congestion-pricing-with-minimal-public-opposition_ead92f06-en.
- Gerike, Regine (2023): Fahrgemeinschaften und Gelegenheitsmitfahrten. Hg. v. Forschungs-Informations-System. TU Dresden.
- Gerlitz, Jean-Yves; Schupp, Jürgen (2005): Zur Erhebung der Big-Five-basierten Persönlichkeitsmerkmale im SOEP. Hg. v. DIW Berlin. DIW Berlin. Berlin. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Juergen-Schupp/publication/228378218_Zur_Erhebung_der_Big-Five-basierten_Persoenlichkeitsmerkmale_im_SOEP/links/09e4150a7a19843714000000/Zur-Erhebung-der-Big-Five-basierten-Persoenlichkeitsmerkmale-im-SOEP.pdf, zuletzt geprüft am 17.03.2023.
- Ghanbartehrani, Saeed; Sanandaji, Anahita; Mokhtari, Zahra; Tajik, Kimia (2020): A Novel Ramp Metering Approach Based on Machine Learning and Historical Data. In: *MAKE 2* (4), S. 379–396. DOI: 10.3390/make2040021.
- Greenshields, B. D.; Bibbins, J. R.; Channing, W. S.; Miller, H. H. (1935): A STUDY OF TRAFFIC CAPACITY. In: Highway Research Board Proceedings (14). Online verfügbar unter <https://trid.trb.org/view/120649>.
- Greenshields, B. D.; Thompson, J. T.; Dickinson, H. C.; Swinton, R. S. (1934): THE PHOTOGRAPHIC METHOD OF STUDYING TRAFFIC BEHAVIOR. In: Highway Research Board Proceedings (13). Online verfügbar unter <https://trid.trb.org/view/120821>.
- Guebert, Alfred A. (2010): Guidelines for the Planning, Design, Operation and Evaluation of Reversible Lane Systems. Hg. v. Transportation Association of Canada. AECOM Canada. Ottawa.
- Guessous, Younes; Aron, Maurice; Bhourri, Neila; Cohen, Simon (2014): Estimating Travel Time Distribution under Different Traffic Conditions. In: *Transportation Research Procedia* 3, S. 339–348. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.10.014.

- Hair, Joseph F.; Black, William C.; Babin, Barry J.; Anderson, Rolph E. (2014, 2010): *Multivariate data analysis*. 7th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Hashemi, Hossein; Abdelghany, Khaled (2018): End-to-End Deep Learning Methodology for Real-Time Traffic Network Management. In: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 33 (10), S. 849–863. DOI: 10.1111/mice.12376.
- Haule, Henrick J.; Alluri, Priyanka; Sando, Thobias (2022): Mobility Impacts of Ramp Metering Operations on Freeways. In: *J. Transp. Eng., Part A: Systems* 148 (2), Artikel 04021109, S. 4021109. DOI: 10.1061/JTEPBS.0000635.
- Hausknecht, Matthew; Au, Tsz-Chiu; Stone, Peter; Fajardo, David; Waller, Travis (2011): Dynamic lane reversal in traffic management. In: 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2011). Washington, DC, USA, 5 - 7 October 2011. 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC 2011). Washington, DC, USA, 10/5/2011 - 10/7/2011. Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE Intelligent Transportation Systems Society. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1929–1934.
- Heinen, Eva (2016): Identity and travel behaviour: A cross-sectional study on commute mode choice and intention to change. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 43, S. 238–253. DOI: 10.1016/j.trf.2016.10.016.
- Heinitz, Florian (2020): Potentiale und Hemmnisse für Pkw-Fahrgemeinschaften in Deutschland - Teilbericht 5. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_11_19_texte_216_2020_personenbefoerderung_tb_5.pdf, zuletzt geprüft am 11.08.2023.
- Highways Agency (2007): Ramp Metering Summary Report 1. Department of Transport. Bristol. Online verfügbar unter https://www.whatdotheyknow.com/request/66223/response/165596/attach/3/Ramp%20Metering%20Summary%20Report%201.pdf?cookie_passthrough=1, zuletzt geprüft am 25.03.2022.
- Hornsey, Matthew J. (2008): Social Identity Theory and Self-categorization Theory: A Historical Review. In: *Social and Personality Psychology Compass* 2 (1), S. 204–222. DOI: 10.1111/j.1751-9004.2007.00066.x.
- Hox, J. J.; Bechger, T. M. (1998): An introduction to structural equation modeling. Online verfügbar unter https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/23738/hox_98_an+introduction+to+structural+equation.pdf?sequence=1.
- Hua, Cheng; Youn-Jeng, Choi, Qingzhou, Shi (2021): *Advanced Regression Methods. Companion to BER 642*: Online verfügbar unter https://bookdown.org/chua/ber642_advanced_regression/, zuletzt geprüft am 11.01.2023.
- Hude, Marlis von der (2020): *Predictive Analytics und Data Mining. Eine Einführung mit R*. 1. Aufl. 2020. Wiesbaden: Springer Vieweg (Springer eBook Collection).

- Information und Technik Nordrhein-Westfalen (2014): Statistik kompakt 03/14. Online verfügbar unter https://www.statistischebibliothek.de/mir/servlets/MCRFileNodeServlet/NWAusgabe_derivate_00000071/Z259201403_A.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2022.
- Jahn, Steffen (2007): Strukturgleichungsmodellierung mit LISREL, AMOS und SmartPLS: Eine Einführung (An Introduction to Structural Equation Modeling with LISREL, AMOS and SmartPLS).
- Jenior, P.; Dowling, R.; Nevers, B.; Neudorff, L. (2016): Use of Freeway Shoulders for Travel. Guide for Planning, Evaluating, and Designing Part-Time Shoulder Use as a Traffic Management Strategy. Hg. v. Federal Highway Administration. Washington D.C. Online verfügbar unter <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop15023/fhwahop15023.pdf>, zuletzt geprüft am 15.03.2022.
- Jin, Xia; Hossan, Md Sakoat; Asgari, Hamidreza; Florida International University (2015): Investigating the value of time and value of reliability for managed lanes. Florida. Dept. of Transportation (BDV29-977-12). Online verfügbar unter <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/29615>.
- Kasraian, Dena; Maat, Kees; Stead, Dominic; van Wee, Bert (2016): Long-term impacts of transport infrastructure networks on land-use change: an international review of empirical studies. In: *Transport Reviews* 36 (6), S. 772–792. DOI: 10.1080/01441647.2016.1168887.
- Klee, Margot (2010): Lebensadern des Imperiums. Strassen im Römischen Reich. Stuttgart: Theiss.
- Knuth, Tobias (2021): Lernende Entscheidungsbäume. In: *Informatik Spektrum* 44 (5), S. 364–369. DOI: 10.1007/s00287-021-01398-0.
- Köll, Helmut; Axhausen, Kay W. (1996): Induzierter Verkehr: Eine Stated-Preference Analyse.
- Krämer, Andreas (2016): Kostenwahrnehmung bei PKW-Reisen – Empirische Analyse zur Schätzung der PKW-Kosten und der wahrgenommenen Kostenkomponenten bei Autofahrern im DACH-Gebiet. In: *Internationales Verkehrswesen* 68, S. 16–19.
- Kress, Daniel; Bertini, Robert; Bogenberger, Klaus (2017): Implementations of Variable Speed Limit Systems: A Worldwide Overview. In: *Annual Meeting of the Transportation Research Board* 97.
- Laval, Jorge; Yin, Yafeng; Lou, Yingyan; Cho, Hyun (2015): Comparative Analysis of Dynamic Pricing Strategies für Managed Lanes. Hg. v. STRIDE. STRIDE.
- Lemeshow, Stanley; Sturdivant, Rodney X.; Hosmer, David W. (2013): Applied Logistic Regression (Wiley Series in Probability and Statistics): Wiley.
- Leonhardt, Axel; Sachse, Thomas; Busch, Fritz (2012): Dynamic control of toll fees for optimal high-occupancy-toll lane operation. In: *TRB 2012*. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1081223/1081223.pdf>, zuletzt geprüft am 17.11.2023.
- Limtanakool, Narisra; Dijst, Martin; Schwanen, Tim (2006): The influence of socioeconomic characteristics, land use and travel time considerations on mode choice for medium- and longer-distance trips. In: *Journal of Transport Geography* 14 (5), S. 327–341. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2005.06.004.

- Lindsay Corporation (2022): Wo lässt sich The Road Zipper-System einsetzen? Online verfügbar unter <https://www.lindsay.com/euas/de/infrastruktur/marken/road-zipper/einsatzm%C3%B6glichkeiten/>, zuletzt aktualisiert am 02.03.2022, zuletzt geprüft am 02.03.2022.
- Litman, Todd Alexander (2001): Generated traffic: Implications for transport planning. In: *ITE Journal* 71 (4), S. 38–47. Online verfügbar unter <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=abfb6589b0995d0e476dbb0c42185d2c415f3b7e>.
- Litman, Todd Alexander (2023): Generated Traffic and Induced Travel. Online verfügbar unter <https://www.vtpi.org/gentraf.pdf>, zuletzt geprüft am 25.10.2023.
- Liu, Yue; Chen, Jun; Wu, Weiguang; Ye, Jiao (2019): Typical Combined Travel Mode Choice Utility Model in Multimodal Transportation Network. In: *Sustainability* 11 (2), S. 549. DOI: 10.3390/su11020549.
- Lombardi, Claudio; Picado-Santos, Luís; Annaswamy, Anuradha M. (2021): Model-Based Dynamic Toll Pricing: An Overview. In: *Applied Sciences* 11 (11), S. 4778. DOI: 10.3390/app11114778.
- Long, J. Scott (2003): Regression models for categorical and limited dependent variables. 8. printing. Thousand Oaks: Sage Publications (Advanced quantitative techniques in the social sciences, 7).
- Lu, Ting; Yang, Zhongzhen; Ma, Dongfang; Jin, Sheng (2018): Bi-Level Programming Model for Dynamic Reversible Lane Assignment. In: *IEEE Access* 6, S. 71592–71601. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2881290.
- M. Milkovits; E. Huang; C. Antoniou; M. Ben-Akiva; J. A. Lopes (2010): DynaMIT 2.0: The Next Generation Real-Time Dynamic Traffic Assignment System. In: 2010 Second International Conference on Advances in System Simulation. 2010 Second International Conference on Advances in System Simulation, S. 45–51.
- Mahmassani, Hani S. (2001): Dynamic Network Traffic Assignment and Simulation Methodology for Advanced System Management Applications. In: *Networks and Spatial Economics* 1 (3/4), S. 267–292. DOI: 10.1023/A:1012831808926.
- Martin, Peter T.; Perrin, Joseph; Hansen, Blake; Kump, Ryan; Moore, Dan (2001): Incident Detection Algorithm Evaluation. (MPC-01-122). Hg. v. University of Utah. Utah Department of Transportation. Salt Lake City. Online verfügbar unter <https://www.ugpti.org/resources/reports/downloads/mpc01-122.pdf>, zuletzt geprüft am 09.08.2022.
- Maruyama, Geoffrey (op. 1998): Basics of structural equation modeling. Thousand Oaks: SAGE.
- May, Adolf D.; Leiman, Lannon; Billheimer, John (2007): Determining the Effectiveness of HOV Lanes. Hg. v. University of California. Institute of Transportation Studies. Berkeley (5326/6326).
- BASt 2018, 2018: Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen MARZ 2018. Online verfügbar unter https://www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Verkehrstechnik/Downloads/MARZ.pdf;jsessionid=BC07E613497C649F5647B9D5C1D98042.live11293?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 20.05.2022.

- Merker, Günter P.; Teichmann, Rüdiger (2014): Grundlagen Verbrennungsmotoren. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Mitusch, Kay (2022): Formen der Bepreisung zur Finanzierung von Verkehrsinfrastruktur. Hg. v. Forschungs-Informations-System. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Online verfügbar unter <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/335946/?markers=335387>, zuletzt aktualisiert am 31.03.2023, zuletzt geprüft am 31.03.2023.
- Mueller, Ralph O.; Hancock, Gregory R. (2018): Structural Equation Modeling. In: Gregory R. Hancock, Laura M. Stapleton und Ralph O. Mueller (Hg.): The Reviewer's Guide to Quantitative Methods in the Social Sciences. Second Edition. | New York : Routledge, 2019. | Revised edition of The reviewer's guide to quantitative methods in the social sciences, 2010.: Routledge, S. 445–456.
- Nedbal-Bures, Brigitte; Pürstl, Gerhard (2019): Das Kraftfahrzeuggesetz 1967 (KFG) : Bundesgesetz vom 23. Juni 1967 BGBl 267 über das Kraftfahrwesen in der Fassung der 1. bis 36. Novelle mit erläuternden Anmerkungen unter Berücksichtigung der Regierungsvorlagen, der Berichte der Parlamentsausschüsse und einschlägiger Nebenvorschriften sowie einer Übersicht der Rechtsprechung. 11. Auflage. Wien: MANZ'sche Verlags- und Universitätsbuchhandlung (Manz Große Ausgabe der Österreichischen Gesetze, 24. Band).
- NETWORK DISPATCHES (2013): Congestion Pricing: Neoliberal approaches and their results in three world cities. Online verfügbar unter <https://networkdispatches.wordpress.com/2013/02/07/congestion-pricing-neoliberal-approaches-in-three-cities/>, zuletzt aktualisiert am 07.02.2013, zuletzt geprüft am 08.04.2022.
- OECD (2018): Städte der Welt. Eine neue Perspektive auf die Urbanisierung. Online verfügbar unter <https://www.oecd.org/cfe/Cities-in-the-World-Policy-Highlights-GER.pdf>, zuletzt geprüft am 21.04.2022.
- Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (2006): RVS 02.04.13: Sonderfahrstreifen für mehrfach besetzte Kraftfahrzeuge und Fahrgemeinschaften. In: RVS - Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen.
- Palma, André de; Lindsey, Robin (2009): Traffic Congestion Pricing Methods and Technologies. Online verfügbar unter <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00414526>.
- Patil, Sunil; Burriss, Mark; Shaw, W. Douglass; Concas, Sisinnio (2011): Variation in the value of travel time savings and its impact on the benefits of managed lanes. In: *Transportation Planning and Technology* 34 (6), S. 547–567. DOI: 10.1080/03081060.2011.600068.
- Patterson, Zachary; Ewing, Gordon; Haider, Murtaza (2005): Gender-Based Analysis of Work Trip Mode Choice of Commuters in Suburban Montreal, Canada, with Stated Preference Data. In: *Transportation Research Record* 1924 (1), S. 85–93. DOI: 10.1177/0361198105192400111.
- Pérez-Méndez, Dante; Gershenson, Carlos; Lárraga, María Elena; Mateos, José L. (2021): Modeling adaptive reversible lanes: A cellular automata approach. In: *PloS one* 16 (1), e0244326. DOI: 10.1371/journal.pone.0244326.

- Phithakkitnukoon, Santi (2022): *Urban Informatics Using Mobile Network Data : Travel Behavior Research Perspectives*. Singapore: Springer.
- Pike, Ed (2010): *Congestion Charging. Challenges and Opportunities*. Hg. v. International Council on Clean Transportation. International Council on Clean Transportation. Online verfügbar unter https://theicct.org/sites/default/files/publications/congestion_apr10.pdf, zuletzt geprüft am 08.04.2022.
- Pipes, L. A. (1967): *CAR FOLLOWING MODELS AND THE FUNDAMENTAL DIAGRAM OF ROAD TRAFFIC*. In: *Transportation Research /UK*. Online verfügbar unter <https://trid.trb.org/view/118041>.
- Poole, Robert (2020): *The Impact of HOV and HOT Lanes on Congestion in the United States. Discussion Paper*. In: *International Transport Forum Discussion Papers (08)*. Online verfügbar unter <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/0b353b17-en.pdf?expires=1665756818&id=id&accname=guest&checksum=CE04ECB65E89F5DAA14E4EEF511A8366>, zuletzt geprüft am 14.10.2022.
- Postpischil, Rafael; Jacob, Klaus; Acht, Martin handelt; Max Schäfer; Dorothea Schmid; Ulrich Fahl (2022): *Forschungsstand verkehrsbezogener Umwelt- und Verteilungswirkungen Eine Literaturstudie zu den Verteilungswirkungen bisheriger und potenzieller Verkehrs- und Umweltpolitik*.
- Prawo o ruchu drogowym. Wysokości grzywien, wzór oświadczenia sprawcy kolizji, taryfikator punktów karnych, program szkolenia kierowców (2022). 9. wydanie, stan prawny na 7 marca 2022 r., uwzględnia zmiany wchodzące w życie z dniem 17 września 2022 r. Warszawa: Wolters Kluwer.
- Rahman, Shams-ur (1998): *Theory of constraints*. In: *International Journal of Operations & Production Management* 18 (4), S. 336–355. DOI: 10.1108/01443579810199720.
- Rapp, Heidrun (2004): *Die Auswirkungen des täglichen Berufspendelns auf den psychischen und körperlichen Gesundheitszustand*. Dissertation. Universität Ulm, Ulm. Medizinische Fakultät.
- Rempel, Shayne (2020): *Managing Express Lanes: Verification and Enforcement Technologies*. In: *Kimley-Horn*, 18.12.2020. Online verfügbar unter <https://www.kimley-horn.com/managing-express-lanes-technologies/>, zuletzt geprüft am 22.02.2022.
- Roback, Paul (2021): *Beyond multiple linear regression. Applied generalized linear models and multilevel models in R*. 1st edition. Boca Raton, FL: CRC Press (Texts in statistical science).
- Ruch Verkehrstechnik (2023): *Spezialmarkierungen*. Online verfügbar unter <https://www.ruch-verkehrstechnik.de/de/spezialmarkierungen.html>, zuletzt aktualisiert am 02.11.2023, zuletzt geprüft am 02.11.2023.
- RUIDISCH, P.; SCHULZ, G.; TOERKEL, B. (2005): *LKW-Maut: Erste Erfahrungen in Deutschland / Road tolls for lorries: first experiences for Germany*. In: *Internationales Verkehrswesen* (AymqwRC7u88Y4JPvIF2F37QKylC04248hLCdJAsh8xgOfe/dVJPV3XS3wLFca1ZMVOtnBfVjaCMTVudWM//5g4AAAB7eyJvcmlnaW4iOiJodHRwczovL3d3dy5nb29nbGV0YWdtYW5hZ2V2YmNvbTo0NDMiLCJmZWZ0dXJlIjojUHJpdmFjeVNHbmluZ3hBZHNBUeIzliwiZXhwaXJ5IjoxNjk1MTY3OTk5LCJpc1Ro aXJkUGFydHkiOnRydWV9). Online verfügbar unter <https://trid.trb.org/view/946291>.

- Schijns, S.; Eng, P. (2006): High occupancy vehicle lanes — worldwide lessons for European practitioners. In: C. A. Brebbia und V. Dolezel (Hg.): Urban Transport XII: Urban Transport and the Environment in the 21st Century. URBAN TRANSPORT 2006. Prague, Czech Republic, 12.07.2006 - 14.07.2006. Southampton, UK: WIT Press, S. 181–193.
- Schönhofer, Thomas; Bogenberger, Klaus (2022): A Comprehensive Review on Managed Lanes in Europe. In: TRB 2022.
- Schönhofer, Thomas; Kaltenhäuser, Bernd; Bogenberger, Klaus: Potentials for Modal Shift through HOV/HOT Lanes in Germany. In: 4th International Symposium on Freeway and Tollway Operations. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1713749/document.pdf>.
- Schönhofer, Thomas; Kaltenhäuser, Bernd; Bogenberger, Klaus (2023a): Analysis of survey data on preferences of German commuters using structural equation modeling. In: TRB 2023, Bd. 102.
- Schönhofer, Thomas; Kaltenhäuser, Bernd; Bogenberger, Klaus (2023b): Potentials for Modal Shift through HOV/HOT Lanes in Germany. In: ISFO 2023 (Hg.): ISFO 2023.
- Schönhofer, Thomas; Kaltenhäuser, Bernd; Bogenberger, Klaus (2024): A Simulation Approach to Estimate the Potential of HOT-Lanes on German Freeways. In: TRB 2024. Washington D.C.
- Schwedes, Oliver (2018): Verkehrspolitik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Schwimmer, Emily; Gomez-Ibanez, Jose A.; Casady, Carter (2019): Toll-managed lane pioneers: Lessons from five US states. In: *Case Studies on Transport Policy* 7 (3), S. 655–666. DOI: 10.1016/j.cstp.2019.05.001.
- Shelat, Sanmay; Cats, Oded; van Lint, J.W.C. (2021): Quantifying travellers' evaluation of waiting time uncertainty in public transport networks. In: *Travel Behaviour and Society* 25, S. 209–222. DOI: 10.1016/j.tbs.2021.07.009.
- Shewmake, Sharon (2012): The Impact of High Occupancy Vehicle Lanes on Vehicle Miles Travelled. In: *SSRN Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.1986503.
- Shires, J. D.; Jong, G. C. de (2009): An international meta-analysis of values of travel time savings. In: *Evaluation and Program Planning* 32 (4), S. 315–325. DOI: 10.1016/j.evalprogplan.2009.06.010.
- Siemens (30.06.2022): Siemens Mobility schließt Verkauf von Yunex Traffic ab | Press | Company | Siemens. Online verfügbar unter <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/siemens-mobility-schliesst-verkauf-von-yunex-traffic-ab>, zuletzt geprüft am 11.08.2023.
- Statista (2022a): Global Facebook user age & gender distribution 2022 | Statista. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/376128/facebook-global-user-age-distribution/>, zuletzt aktualisiert am 24.11.2022, zuletzt geprüft am 24.11.2022.
- Statista (2022b): Global LinkedIn user age distribution 2022 | Statista. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/273505/global-linkedin-age-group/>, zuletzt aktualisiert am 24.11.2022, zuletzt geprüft am 24.11.2022.

- Statista (2022c): Instagram: age distribution of global audiences 2022 | Statista. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/325587/instagram-global-age-group/>, zuletzt aktualisiert am 24.11.2022, zuletzt geprüft am 24.11.2022.
- Statista (2023a): Verkehr in Deutschland - Fahrleistung von Pkw bis 2021 | Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2984/umfrage/entwicklung-der-fahrleistung-von-pkw/>, zuletzt aktualisiert am 11.07.2023, zuletzt geprüft am 11.07.2023.
- Statista (2023b): Pkw-Bestand nach Emissionsklassen 2023 | Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/6701/umfrage/gemeldete-pkw-je-emissionsklasse/>, zuletzt aktualisiert am 20.07.2023, zuletzt geprüft am 20.07.2023.
- Statista (2023c): Fahrgemeinschaft zum Arbeitsplatz | Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/249887/umfrage/umfrage-zu-fahrgemeinschaften-zum-arbeitsplatz/>, zuletzt aktualisiert am 11.08.2023, zuletzt geprüft am 11.08.2023.
- Statista (2023d): Elektroautos - Anteil am Pkw-Bestand 2030 | Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1202904/umfrage/anteil-der-elektroautos-am-pkw-bestand-in-deutschland/>, zuletzt aktualisiert am 07.11.2023, zuletzt geprüft am 07.11.2023.
- Statista (2023e): Verkehr in Deutschland - Fahrleistung von Pkw bis 2021 | Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2984/umfrage/entwicklung-der-fahrleistung-von-pkw/>, zuletzt aktualisiert am 16.11.2023, zuletzt geprüft am 16.11.2023.
- Statistisches Bundesamt (2022): Berufspendler. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/Tabellen/pendler1.html>, zuletzt aktualisiert am 31.01.2022, zuletzt geprüft am 30.11.2022.
- Statistisches Bundesamt Deutschland (2022): Verbraucherpreisindex. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Bonn. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=61111-0001&startjahr=1991#abreadcrumb>, zuletzt aktualisiert am 24.03.2023, zuletzt geprüft am 24.03.2023.
- Stoltzfus, Jill C. (2011): Logistic regression: a brief primer. In: *Academic emergency medicine : official journal of the Society for Academic Emergency Medicine* 18 (10), S. 1099–1104. DOI: 10.1111/j.1553-2712.2011.01185.x.
- Straßenverkehrszentrale Baden-Württemberg (2018): Zuflussregelung. Hg. v. Straßenverkehrszentrale Baden-Württemberg. Online verfügbar unter <https://www.svz-bw.de/verkehrsbeeinflussungsanlagen/zuflussregelung>, zuletzt aktualisiert am 01.04.2022, zuletzt geprüft am 01.04.2022.
- Suhr, Diana (2006): The basics of structural equation modeling. Online verfügbar unter <https://www.lexjansen.com/wuss/2006/tutorials/tut-suhr.pdf>.
- Tajfel (1978): Interindividual behavior and intergroup behavior, S. 27.
- Tantillo, Michael; Roberts, Edwin; Mangar, Uzoamaka (2020): Roles of Transportation Management Centers in Incident Management on Managed Lanes: Chapter 1-Introduction and Background - FHWA

- Office of Operations. Hg. v. United States Department of Transportation. Federal Highway Administration. Online verfügbar unter <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop14022/chapter1.htm>, zuletzt aktualisiert am 19.05.2020, zuletzt geprüft am 23.02.2022.
- Tarka, Piotr (2018): An overview of structural equation modeling: its beginnings, historical development, usefulness and controversies in the social sciences. In: *Qual Quant* 52 (1), S. 313–354. DOI: 10.1007/s11135-017-0469-8.
- TEMPUS (2023): Vernetzt.Digital.Voraus. Unter Mitarbeit von TU München - Lehrstuhl für Verkehrstechnik. Hg. v. Projektkonsortium Tempus. München.
- Texas Transportation Institute et al. (1998): NCHRP Report 414. HOV Systems Manual. Unter Mitarbeit von Sharon D. Banks, Wayne Shackelford, Robert E. Skinner Jr, et al. Hg. v. Transportation Research Board. U.S. Department of Transportation. Washington D.C. Online verfügbar unter https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_414.pdf, zuletzt geprüft am 04.01.2022.
- Thorhauge, Mikkel; Kassahun, Habtamu Tilahun; Cherchi, Elisabetta; Haustein, Sonja (2020): Mobility needs, activity patterns and activity flexibility: How subjective and objective constraints influence mode choice. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 139, S. 255–272. DOI: 10.1016/j.tra.2020.06.016.
- Toll Collect (2023): Einbuchen mit der On-Board Unit. <https://plus.google.com/102666158678468351211>. Online verfügbar unter https://www.toll-collect.de/de/toll_collect/fahren/einbuchung/automatisch_einbuchen_mit_der_on_board_unit/Einbuchung.html, zuletzt aktualisiert am 02.11.2023, zuletzt geprüft am 02.11.2023.
- Townes, Michael; Boardman, Joseph; Skinner, Robert (2004): Convertible Roadways and Lanes. NCHRP Synthesis 340. A Synthesis of Highway Practice. Washington, D.C.: Transportation Research Board. Online verfügbar unter https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_340.pdf?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=de&_x_tr_hl=de&_x_tr_pto=sc, zuletzt geprüft am 25.02.2022.
- Treiber, Martin; Kesting, Arne (2010): Verkehrsdynamik und -simulation. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Turner (1985): Social categorization and the self-concept: A social cognitive theory of group behaviour, S. 77.
- U.S. Department of Transportation (09/2016): Revised Departmental Guidance on Valuation of Travel Time in Economic Analysis, vom Revision 2.
- United States Department of Transportation (2022): Reversible Lane Management. The National ITS Reference Architecture. Online verfügbar unter <https://www.arc-it.net/html/servicepackages/sp134.html#tab-8>, zuletzt aktualisiert am 28.09.2022, zuletzt geprüft am 18.10.2022.

- Universität Zürich (2023): UZH - Methodenberatung - Logistische Regressionsanalyse. Online verfügbar unter https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/zusammenhaenge/lreg.html, zuletzt aktualisiert am 19.01.2023, zuletzt geprüft am 19.01.2023.
- Urbistat (2023): Altersklassen nach GeschlechtRegion BAYERN, Alterungsindex und Durchschnittsalter der Ansässigen. Hg. v. AdminStat Germania. Modena. Online verfügbar unter <https://ugeo.urbistat.com/AdminStat/de/de/demografia/eta/bayern/9/2>, zuletzt aktualisiert am 14.04.2023, zuletzt geprüft am 14.04.2023.
- Versilis inc. (2020): Reversible HOV Access Ramp. Online verfügbar unter <https://www.versilis.com/applications/permanent/>, zuletzt aktualisiert am 25.02.2020, zuletzt geprüft am 03.03.2022.
- Vickrey, William (1963): Pricing in Urban and Suburban Transport. In: *The American Economic Review* 53 (2), S. 452–465. Online verfügbar unter https://cooperative-individualism.org/vickrey-william_pricing-in-urban-and-suburban-transport-1963-may.pdf, zuletzt geprüft am 06.04.2022.
- Vickrey, William (1992): Principles of Efficient Congestion Pricing. Hg. v. Columbia University.
- Waleczek, Helen Elisabeth (2020): Raumzeitliche Analyse der Sicherheitswirkungen der temporären Seitenstreifenfreigabe auf Autobahnen. Raumzeitliche Analyse der Sicherheitswirkungen der temporären Seitenstreifenfreigabe auf Autobahnen, Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, Bochum.
- Walther, Klaus; Thomä, Frank (1980): Verkehrsaufteilung mit gewichteten Freizeitkomponenten. Ein Tri-modal-Split-Modell für den städtischen Personenverkehr. Opladen: Westdt. Verl. (Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, 2935 : Fachgruppe Umwelt/Verkehr).
- Wei, Jiarong; Wei, Liying; Cui, Yufeng (2017 - 2017): Reversible Lane Scheme Selection Model Based on the BPR Function and Environmental Benefits. In: Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Materials Science, Machinery and Energy Engineering (MSMEE 2017). 2017 2nd International Conference on Materials Science, Machinery and Energy Engineering (MSMEE 2017). Dalian, China, 5/13/2017 - 5/14/2017. Paris, France: Atlantis Press.
- Weiber, Rolf; Sarstedt, Marko (2021): Strukturgleichungsmodellierung. Eine anwendungsorientierte Einführung in die Kausalanalyse mit Hilfe von AMOS, SmartPLS und SPSS. 3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Gabler (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1561552>.
- Werner, Christina; Schermelleh-Engel, Karin (2010): Variablen und Parameter in LISREL. Online verfügbar unter https://www.psychologie.uzh.ch/dam/jcr:fffff-b371-2797-ffff-ffffdf7a8a63/lisrel_symbols.pdf, zuletzt geprüft am 08.12.2022.
- Weston, Rebecca; Gore, Paul A. (2006): A Brief Guide to Structural Equation Modeling. In: *The Counseling Psychologist* 34 (5), S. 719–751. DOI: 10.1177/0011000006286345.
- Weyland, Claude; Buck, H. Sebastian; Vortisch, Peter; Zeidler, Verena (2019): Analysis of the Effects of an HOV Lane on a German Freeway \textendash A Simulation Study With PTV VISSIM. In: TRB 98th Annual Meeting Compendium of Papers. Ed.: Transportation Research Board.

- Winter, Konstanze; Cats, Oded; Martens, Karel; van Arem, Bart (2021): Relocating shared automated vehicles under parking constraints: assessing the impact of different strategies for on-street parking. In: *Transportation* 48 (4), S. 1931–1965. DOI: 10.1007/s11116-020-10116-w.
- Wood, Nick; Gupta, Vivek; Cardenas, James P.; Jinuk Hwang, Deepak (2021): National Inventory of Specialty Lanes and Highways. Technical Report. Hg. v. Federal Highway Administration. Texas A&M Transportation Institute (FHWA-HOP-20-043). Online verfügbar unter <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop20043/fhwahop20043.pdf>, zuletzt geprüft am 23.07.2021.
- Wral (2013): Ramp Meters. Hg. v. Capital Broadcasting Company, Inc. Online verfügbar unter https://www.wral.com/news/local/image/12401549/?ref_id=12864296, zuletzt aktualisiert am 01.04.2022, zuletzt geprüft am 01.04.2022.
- Wright, R. E. (1995): Logistic regression. Online verfügbar unter <https://psycnet.apa.org/record/1995-97110-007>.
- Wu, Ning (2000): Verkehr auf Schnellstraßen im Fundamentaldiagramm - Ein neues Modell und seine Anwendungen (Fundamental Diagrams and its Applications for High-speed Highways). In: *Straßenverkehrstechnik* 44 (8). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/259997661_Verkehr_auf_Schnellstrassen_im_Fundamental_diagramm_-_Ein_neues_Modell_und_seine_Anwendungen_Fundamental_Diagrams_and_its_Applications_for_High-speed_Highways.
- Xie, Chi; Lin, Dung-Ying; Travis Waller, S. (2010): A dynamic evacuation network optimization problem with lane reversal and crossing elimination strategies. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 46 (3), S. 295–316. DOI: 10.1016/j.tre.2009.11.004.
- Yin, Yafeng; Lou, Yingyan (2009): Dynamic Tolling Strategies for Managed Lanes. In: *J. Transp. Eng.* 135 (2), S. 45–52. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:2(45).
- Zachary Howard, Clark Williams-Derry (2012): How Much Do Drivers Pay for a Quicker Commute? In: *Sightline Institute*, 01.08.2012. Online verfügbar unter <https://www.sightline.org/2012/08/01/how-much-do-drivers-pay-for-a-quicker-commute/>, zuletzt geprüft am 09.11.2023.
- Zhang, Michael; Taewan, Kim; Xiaojian, Nie; Wenlong, Jin; Lianyu, Chu; Recker, Will (2001): Evaluation of On-ramp Control Algorithms. Hg. v. California PATH Program. University of California. Berkeley. Online verfügbar unter <https://www.its.uci.edu/~wjn/publications/zhang2001metering.pdf>, zuletzt geprüft am 25.04.2022.
- Zhang, Shu; Campbell, Ann Melissa; Ehmke, Jan Fabian (2018): Impact of Congestion Pricing Schemes on Costs and Emissions of Commercial Fleets in Urban Areas. Hg. v. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Fakultät für Wirtschaftswissenschaft. Magdeburg. Online verfügbar unter https://www.fww.ovgu.de/fww_media/femm/femm_2018/2018_08.pdf, zuletzt geprüft am 20.10.2022.
- Ziegler, A.; Lange, S.; Bender, R. (2004): Survival analysis: Cox regress. In: *Dtsch med Wochenschr* 129, T1-T3. DOI: 10.1055/s-2004-836074.

Zoll- & Frachtzentrale Rhein-Main (2022): Geschichte des Zolls. Bundesministerium für Finanzen. Online verfügbar unter <https://www.zoll-service.eu/geschichte-des-zolls/>, zuletzt aktualisiert am 13.04.2022, zuletzt geprüft am 13.04.2022.

Zou, Guangyong (2004): A modified poisson regression approach to prospective studies with binary data. In: *American journal of epidemiology* 159 (7), S. 702–706. DOI: 10.1093/aje/kwh090.

Anhang A – Umfrage

Umfrage zu Fahrgemeinschaften und Vorlieben für den Arbeitsweg

Sehr geehrte Damen und Herren,
herzlich willkommen bei dieser Umfrage des Lehrstuhls für Verkehrstechnik der TU München und vielen Dank, dass Sie sich Zeit für uns nehmen. Die folgende Umfrage dauert nur 5-10 Minuten und behandelt die Themen Fahrgemeinschaften und was Ihnen bei Ihrem Arbeitsweg besonders wichtig ist. Ihre Antworten sind sehr wertvoll für unsere Forschungen zur Frage, wie der Verkehr der Zukunft aussehen könnte. Selbstverständlich erfolgt die Umfrage komplett anonym und aus den gewonnenen Daten können keine Rückschlüsse auf Ihre Person gezogen werden. Das Gewinnspiel ist abgeschlossen, die Gewinner wurden kontaktiert.

* Erforderlich

1. Wie groß ist der Anteil öffentlicher Verkehrsmittel (ÖPNV) an Ihrem Weg zur Arbeit? *

- Vollständig (Sie legen den überwiegenden Teil Ihres Arbeitswegs mit dem ÖPNV zurück)
- Teilweise (Sie nutzen für Teile der Strecke oder nur zu bestimmten (Jahres-)Zeiten den ÖPNV)
- Gar nicht (Für Ihren Arbeitsweg nutzen Sie keine öffentlichen Verkehrsmittel)

2. Wie weit ist Arbeitsweg [km] (ohne Homeoffice, einfache Fahrtstrecke)? *

- < 2 km
- 2 – 5 km
- 5 – 10 km
- 10 - 30 km
- 30 - 50 km
- > 50 km

3. Wie lange [min] benötigen Sie durchschnittlich für Ihren Arbeitsweg(ohne Homeoffice, einfache Strecke)? *

- < 10 min
- 10 – 20 min
- 20 – 30 min
- 30 – 45 min
- 45 – 60 min
- > 60 min

4. Wie groß schätzen Sie den Anteil [km] folgender Straßenklassen an Ihrem Arbeitsweg? *

	0 km	1 - 5 km	5 - 10 km	10 - 20 km	20 - 30 km	> 30 km
Autobahn	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bundes- / Landstraße	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Städtische Straße	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

5. Haben Sie grundsätzlich die Möglichkeit, Ihre Arbeitsstelle in einer angemessenen Zeit mit dem ÖPNV zu erreichen? *

- Ja
- Nein

6. Wie oft bilden Sie derzeit mit Kollegen / Nachbarn / Familienmitgliedern eine Fahrgemeinschaft zur Arbeit? *

- Nie
- < 1 mal pro Woche
- 1 – 2 mal pro Woche
- 3 – 4 mal pro Woche
- 5 mal pro Woche

7. Angenommen, Sie dürfen als Fahrgemeinschaft den Standstreifen als Expressspur nutzen, welche Bedeutung haben folgende Vorteile einer Fahrgemeinschaft für Sie? Werten Sie bitte in absteigender Reihenfolge (das Wichtigste oben), beginnen Sie mit dem für Sie wichtigsten. *

Finanzielle Vorteile (Geteiltes Benzingeld, Geringerer Fahrzeugverschleiß, ...)

Fahrzeitvorteile (Ich darf Expressspuren in Staubereichen nutzen)

Soziale Vorteile (Ich bin mit meinem Mitfahrer befreundet, ...)

Ökologische Aspekte (Geringerer Schadstoffausstoß)

8. Sehen Sie in der Nutzung von Fahrgemeinschaften weitere, über die in Frage 7 genannten hinausgehende, Vorteile?

9. Welche Art von Fahrgemeinschaft würden Sie grundsätzlich bevorzugen? *

- Flexible / Spontane Gruppen, zeitlich flexibel aber dafür mit unbekanntem Menschen
- Fixe Fahrgemeinschaft, immer gleiche Uhrzeit, dafür mit bekannten Menschen

10. Wie lange [min] benötigen Sie durchschnittlich für Ihren Arbeitsweg(ohne Homeoffice, einfache Strecke)? *

- Keine. Finanzielle Vorteile oder die gemeinsame Fahrt mit anderen würden mir genügen.
- Mindestens 5 Minuten, entspricht Fahrzeit von 25 Minuten
- Mindestens 5 Minuten, entspricht Fahrzeit von 25 Minuten
- Mindestens 5 Minuten, entspricht Fahrzeit von 25 Minuten
- Mindestens 5 Minuten, entspricht Fahrzeit von 25 Minuten
- Mindestens 5 Minuten, entspricht Fahrzeit von 25 Minuten
- Ich möchte keine Fahrgemeinschaft eingehen.

11. Auf einer Skala von 1 - 5 (1 am unwichtigsten, 5 am wichtigsten), wie wichtig ist Ihnen die Flexibilität (Fahrzeitpunkt, Zwischenstopps, ...) bei Ihrem Arbeitsweg? *

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

12. Auf einer Skala von 1 - 5 (1 am unwichtigsten, 5 am wichtigsten), wie wichtig ist Ihnen der Kostenfaktor bei Ihrem Arbeitsweg? *

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

13. Auf einer Skala von 1 - 5 (1 am unwichtigsten, 5 am wichtigsten), wie wichtig ist Ihnen die Fahrtzeit bei Ihrem Arbeitsweg? *

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

14. Wie wichtig sind Ihnen die Kosten im Vergleich zur Flexibilität? (1 Kosten am wichtigsten, 7 Flexibilität am wichtigsten) *

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

15. Wie würden Sie die Lage Ihres **Wohnortes** beschreiben? *

- Urban / Großstadt (> 60.000 Einwohner)
- Vorort / Mittelzentrum (15.000 – 60.000 Einwohner)
- Ländlich / Kleinstadt (< 15.000 Einwohner)

16. Wie würden Sie die Lage Ihres **Arbeitsplatzes** beschreiben? *

- Urban / Großstadt (> 60.000 Einwohner)
- Vorort / Mittelzentrum (15.000 – 60.000 Einwohner)
- Ländlich / Kleinstadt (< 15.000 Einwohner)

17. Können Sie sich grundsätzlich vorstellen, für die Nutzung einer Expressspur im Stau Geld zu bezahlen? *

- Ja
- Nein

18. Stellen Sie sich vor, Sie fahren morgens zur Arbeit und Ihre Fahrt dauert 45 min. Durch die Nutzung einer Expressspur, welche für **Fahrgemeinschaften kostenlos** ist und für **allein Reisende eine Nutzungsgebühr von 5 €** kostet, könnten Sie allerdings Ihre **Fahrtzeit zuverlässig auf 35 min reduzieren**. Wählen Sie aus den folgenden Optionen, wie häufig Sie welche Variante nutzen würden.

*

	Weniger als 1 Tag pro Woche	1-2 Tage Pro Woche	3-4 Tage Pro Woche	5 oder Mehr Tage Pro Woche
Ich nutze die Expressspur und zahle dafür 5 €.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich nutze die Expressspur kostenlos indem ich eine Fahrgemeinschaft eingehe.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich nehme die verlängerte Fahrtzeit in Kauf.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich wechsele auf vorhandene Angebote des ÖPNVs (Zeit wie bei Expressspur, ohne Zusatzkosten im Vergleich zum PKW).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

19. Stellen Sie sich vor, Sie fahren morgens zur Arbeit und Ihre Fahrt dauert 45 min. Durch die Nutzung einer Expressspur, welche für **Fahrgemeinschaften kostenlos** ist und für **allein Reisende eine Nutzungsgebühr von 5 €** kostet, könnten Sie allerdings Ihre **Fahrtzeit zuverlässig auf 25 min**

reduzieren. Wählen Sie aus den folgenden Optionen, wie häufig Sie welche Variante nutzen würden.

*

	Weniger als 1 Tag pro Woche	1-2 Tage Pro Woche	3-4 Tage Pro Woche	5 oder Mehr Tage Pro Woche
Ich nutze die Expressspur und zahle dafür 5 €.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich nutze die Expressspur kostenlos indem ich eine Fahrgemeinschaft eingehe.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich nehme die verlängerte Fahrzeit in Kauf.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich wechsele auf vorhandene Angebote des ÖPNVs (Zeit wie bei Expressspur, ohne Zusatzkosten im Vergleich zum PKW).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

20. Stellen Sie sich vor, Sie fahren morgens zur Arbeit und Ihre Fahrt dauert 45 min. Durch die Nutzung einer Expressspur, welche für **Fahrgemeinschaften kostenlos** ist und für **allein Reisende eine Nutzungsgebühr von 10 €** kostet, könnten Sie allerdings Ihre **Fahrtzeit zuverlässig auf 35 min reduzieren**. Wählen Sie aus den folgenden Optionen, wie häufig Sie welche Variante nutzen würden.

*

	Weniger als 1 Tag pro Woche	1-2 Tage Pro Woche	3-4 Tage Pro Woche	5 oder Mehr Tage Pro Woche
Ich nutze die Expressspur und zahle dafür 10 €.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich nutze die Expressspur kostenlos indem ich eine Fahrgemeinschaft eingehe.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich nehme die verlängerte Fahrzeit in Kauf.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich wechsele auf vorhandene Angebote des ÖPNVs (Zeit wie bei Expressspur, ohne Zusatzkosten im Vergleich zum PKW).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

21. Stellen Sie sich vor, Sie fahren morgens zur Arbeit und Ihre Fahrt dauert 45 min. Durch die Nutzung einer Expressspur, welche für **Fahrgemeinschaften kostenlos** ist und für **allein Reisende eine Nutzungsgebühr von 10 €** kostet, könnten Sie allerdings Ihre **Fahrtzeit zuverlässig auf 25 min reduzieren**. Wählen Sie aus den folgenden Optionen, wie häufig Sie welche Variante nutzen würden.

*

	Weniger als 1 Tag pro Woche	1-2 Tage Pro Woche	3-4 Tage Pro Woche	5 oder Mehr Tage Pro Woche
Ich nutze die Expressspur und zahle dafür 10 €.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich nutze die Expressspur kostenlos indem ich eine Fahrgemeinschaft eingehe.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich nehme die verlängerte Fahrzeit in Kauf.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich wechsele auf vorhandene Angebote des ÖPNVs (Zeit wie bei Expressspur, ohne Zusatzkosten im Vergleich zum PKW).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

22. Stellen Sie sich vor, Sie fahren morgens zur Arbeit und Ihre Fahrt dauert 45 min. Durch die Nutzung einer Expressspur, welche für **Fahrgemeinschaften kostenlos** ist und für **allein Reisende eine Nutzungsgebühr von 20 €** kostet, könnten Sie allerdings Ihre **Fahrtzeit zuverlässig auf 35 min reduzieren**. Wählen Sie aus den folgenden Optionen, wie häufig Sie welche Variante nutzen würden.

*

	Weniger als 1 Tag pro Woche	1-2 Tage Pro Woche	3-4 Tage Pro Woche	5 oder Mehr Tage Pro Woche
Ich nutze die Expressspur und zahle dafür 20 €.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich nutze die Expressspur kostenlos indem ich eine Fahrgemeinschaft eingehe.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich nehme die verlängerte Fahrzeit in Kauf.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich wechsele auf vorhandene Angebote des ÖPNVs (Zeit wie bei Expressspur, ohne Zusatzkosten im Vergleich zum PKW).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

23. Stellen Sie sich vor, Sie fahren morgens zur Arbeit und Ihre Fahrt dauert 45 min. Durch die Nutzung einer Expressspur, welche für **Fahrgemeinschaften kostenlos** ist und für **allein Reisende eine Nutzungsgebühr von 20 €** kostet, könnten Sie allerdings Ihre **Fahrtzeit zuverlässig auf 25 min reduzieren**. Wählen Sie aus den folgenden Optionen, wie häufig Sie welche Variante nutzen würden.

*

	Weniger als 1 Tag pro Woche	1-2 Tage Pro Woche	3-4 Tage Pro Woche	5 oder Mehr Tage Pro Woche
Ich nutze die Expressspur und zahle dafür 20 €.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich nutze die Expressspur kostenlos indem ich eine Fahrgemeinschaft eingehe.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich nehme die verlängerte Fahrzeit in Kauf.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich wechsele auf vorhandene Angebote des ÖPNVs (Zeit wie bei Expressspur, ohne Zusatzkosten im Vergleich zum PKW).	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

24. Wie würden Sie Ihre finanzielle Situation auf Basis des Haushaltseinkommens im Vergleich zu anderen Deutschen beschreiben? *

- Unterdurchschnittlich
- Durchschnittlich
- Überdurchschnittlich
- Keine Angabe

25. Wie würden Sie Ihr Konsumverhalten auf einer Skala von 1 bis 5 beurteilen, wenn 1 sehr sparsam und 5 sehr freigiebig ist? *

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

26. Wie viele Tage pro regulärer Arbeitswoche fahren Sie durchschnittlich zu Ihrer Arbeitsstelle? *

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

27. Wie viele Tage pro regulärer Arbeitswoche haben Sie morgens wichtige Termine an der Arbeitsstelle, so dass Sie unbedingt pünktlich sein müssen? (kein Homeoffice) *

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

28. Wie würden Sie die Flexibilität Ihres Arbeitsplatzes generell beschreiben? *

- Unflexibel (Definierter Arbeitsort, Arbeitsbeginn und –ende sehr starr geregelt, z.B.Schichtarbeit)
- Eingeschränkt flexibel (Feste Arbeitszeiten und –ort, aber Gestaltungsmöglichkeiten, beispielsweise über tageweises Homeoffice oder flexible Arbeitszeiten um eine Kernzeit, z.B. Bürojob mit Gleitzeitkonto oder Hausmeisterarbeiten)
- Flexibel (Arbeitszeiten und –orte sehr frei wählbar, z.B. Bürojob ohne festePräsenzzeiten oder Freelancer)

29. Ihr Geschlecht?

- Männlich
- Weiblich
- Divers

30. Ihr Alter?

- Bis 20
- 21 – 30
- 31 – 40
- 41 – 50
- 51 – 60
- 61 – 70
- 70+

31. Wenn Sie am Gewinnspiel teilnehmen möchten, geben Sie bitte hier Ihre E-Mail-Adresse ein. Die Daten werden ausschließlich für das Gewinnspiel verwendet. **Es ist keine weitere Teilnahme am Gewinnspiel mehr möglich.**