Masterthesis

Klimapolitikmaßnahmen zur Dekarbonisierung des Verkehrs in Flensburg: Eine modellbasierte Analyse

Johanna Sendker

Matrikelnummer: 552920

Energie- und Umweltmanagement (M.Eng.)

01. September 2022

Erstprüferin: Prof. Dr. Frauke Wiese

Zweitprüfer: M.Sc. Marlin Arnz

Eigenständigkeitserklärung

Laut § 21 Abs. 9 GPO 2015 der Europa-Universität Flensburg:

„Hiermit versichere ich ausdrücklich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Ich versichere insbesondere ausdrücklich, dass ich bei Anfertigung der vorliegenden Arbeit keine Dienstleistungen oder sonstigen Unterstützungsleistungen, gleich welcher Art, von Ghostwriter-Agenturen bzw. vergleichbaren Dienstleistungsanbietern oder sonstigen Dritten, gleich ob entgeltlich oder unentgeltlich, in Anspruch genommen habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus gedruckten, elektronischen oder anderen Quellen entnommene oder entlehnte Textstellen sind von mir eindeutig als solche gekennzeichnet worden.

Die vorgelegte Arbeit oder wesentliche Teile daraus wurden vorher nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht, und die eingereichte schriftliche Fassung entspricht derjenigen auf dem elektronischen Speichermedium.

Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen diese Versicherung nicht nur zur Bewertung der vorgelegten Prüfungsleistung mit „nicht ausreichend“ (5,0), sondern in schwerer wiegenden Fällen zu weiteren Maßnahmen der Europa-Universität Flensburg bis zur Exmatrikulation führen können.

Mir ist bekannt, dass die Arbeit digital gespeichert und durch eine Anti-Plagiatssoftware überprüft werden kann. Sowohl mit der Datenspeicherung als auch mit der Überprüfung meiner Arbeit durch den Einsatz einer Anti-Plagiatssoftware erkläre ich mich einverstanden.“

Flensburg den 31.08.2022

„*Essentially, all models are wrong,*
*but some are useful.***“ – George Box**

Abstract

Zum Erreichen der Klimaziele ist es essenziell, den Verkehrssektor umzugestalten. Die zurzeit gegebenen klimapolitischen Maßnahmen der Regierung stecken bereits seit längerem in den unterschiedlichsten Stadien. Jedoch zeigen die Daten, dass sie bislang noch einen deutlich zu geringen Effekt erzielen, um langfristig die gesetzten Ziele zu erreichen. In der Stadt Flensburg ist der Verkehrssektor für ca. 28% der ausgestoßenen Emissionen verantwortlich und die bisher implementierten Maßnahmen konnten kaum eine Emissionsreduktion bewirken.

In dieser Arbeit wird ein Verkehrsmodell entwickelt, welches auf dem makroskopischen Personenverkehrsmodell Quetzal_Germany (Arnz 2022) basiert. Es werden verschiedene Szenarien modelliert, die jeweils eine oder mehrere Maßnahmen zur Förderung von nachhaltiger Mobilität enthalten. Dazu gehören die Einführung eines 9€-Tickets, die Stärkung des Umweltverbundes, die Vermeidung der Autonutzung sowie die Einschränkung der Autonutzung. Die Maßnahmen wurden sowohl einzeln als auch kombiniert in verschiedenen Ausprägungsstufen im Modell simuliert, um ihre Singuläre-, ihre Gesamtwirkung sowie davon abgeleitete Effekte festzustellen. Anhand vom Modal Split werden die Ergebnisse miteinander verglichen, wobei vor allem die Minimierung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) als entscheidender Schritt Richtung nachhaltiger Mobilität gilt.

Die besten Ergebnisse konnten durch eine Maßnahmenkombination erzielt werden. Bei Simulationen ohne die Einschränkung der Autonutzung konnte der Anteil am MIV um 25,4% gesenkt werden, was vor allem durch den ÖPNV (+20,8%) und Fußverkehr (+8%) ausgeglichen wurden. Da ein starker Ausbau des ÖPNVs den Fahrradverkehr negativ beeinflusst sank dieser ebenfalls um 3,2% ab. Bei einer vollständigen Einschränkung der Autonutzung (MIV gleich null) ist der entsprechende Ausgleich durch den Umweltverbund umso höher. Dies verdeutlicht das große Potential des Umweltverbundes in Flensburg. Erwartete positive Effekte bei einer Implementierung sind neben einer Minderung der Emissionen Veränderungen in der Raumnutzung, höhere Lebensqualität und mehr Verkehrssicherheit.

Das Flensburger Modell bildet eine gute Grundlage für Analysefragen im Flensburger Stadtgebiet und sollte jedoch bei weiterführender Forschung entsprechend angepasst werden. Insgesamt bemerkbar ist, dass die Maßnahmen stark ausgeprägt sein müssen, um einen bedeutenden Effekt zu erzielen. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, dass neben wirkungsvollen Maßnahmen auch politische und gesetzliche Grundlagen geschaffen werden müssten, um diese dann schlussendlich auch umzusetzen.

Inhaltsverzeichnis

Eigenständigkeitserklärung ..... **III**

Zitat ..... **IV**

Abstract ..... **V**

Inhaltsverzeichnis ..... **VI**

Abbildungsverzeichnis ..... **VIII**

Tabellenverzeichnis ..... **IX**

Abkürzungsverzeichnis ..... **X**

1 Einleitung **1**

1.1 Problemstellung 2

1.2 Forschungsstand Transportmodellierung 4

1.2.1 Mikroskopische Verkehrsmodelle 7

1.2.2 Makroskopische Verkehrsmodelle 8

1.2.3 Mischformen und weitere Modelle 9

1.3 Fragestellung und Zielsetzung 10

2 Methodik und Theorie **11**

2.1 Modellgrundlage Quetzal_Germany 12

2.1.1 Vierstufige Verkehrsmodellierung 12

2.1.2 Quetzal 13

2.1.3 Modellstruktur Quetzal_Germany 15

2.2 Anwendung für Flensburg 17

2.2.1 Modellanpassungen für Quetzal_Flensburg 17

2.2.2 Dateneingabe 18

2.2.3 Kalibrierung 21

2.2.4 Systemgrenzen 22

2.3 Mobilitätsumfrage 23

2.4 Szenario 0: Basisfall Flensburg 23

3 Szenarien **26**

3.1 Szenario 1: 9€-Ticket 27

3.2 Szenario 2: Umweltverbund 27

3.3 Szenario 3: Autovermeidung 29

3.4 Szenario 4: Autofrei 29

3.5 Szenario 5: Kombination der Szenarien 30

4 Ergebnisse ... 32
4.1 Szenario 1: 9€-Ticket ... 32
4.2 Szenario 2: Umweltverbund ... 33
4.2.1 Verbesserung der Fahrradinfrastruktur ... 33
4.2.2 Verbesserung der Businfrastruktur ... 34
4.2.3 Gleichzeitige Verbesserung der Fahrrad- und Businfrastruktur ... 36
4.3 Szenario 3: Autovermeidung ... 38
4.4 Szenario 4: Autofrei ... 39
4.5 Szenario 5: Kombination ... 41
4.5.1 Szenario 5.A mit autofreiem Tag ... 41
4.5.2 Szenario 5.B ohne autofreien Tag ... 43
4.6 Gegenüberstellung und Zwischenfazit ... 45
4.7 Weiterführende Veränderungen ... 48
4.7.1 THG-Emissionen ... 48
4.7.2 Raumnutzung und Lebensqualität ... 49
4.7.3 Verkehrssicherheit ... 49

5 Diskussion und Interpretation ... 51
5.1 Ergebnisse im Flensburger Kontext ... 51
5.2 Kritische Reflexion ... 52
5.3 Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf ... 53

6 Zusammenfassung ... 54

Literaturverzeichnis ... XV

Anhang ... XX
A. Auszug der EnSu Mobilitätsumfrage in Flensburg ... XX
A.1 Auszug Fragebogen zur Erfassung von Start- und Zielzone ... XX
A.2 Ergebnisse von Frage 2 ... XXIII
B. Eingesetzte Modellparameter ... XXIV
B.1 Szenario 2: Umweltverbund ... XXIV
B.2 Szenario 3: Autovermeidung ... XXIV
C. Modellergebnisse ... XXV
C.1 Modellergebnisse Szenario 1: 9€-Ticket ... XXV
C.2 Modellergebnisse Szenario 2: Umweltverbund ... XXV
C.3 Modellergebnisse Szenario 3: Autovermeidung ... XXIX
C.4 Modellergebnisse Szenario 4: Autofrei ... XXX
C.5 Modellergebnisse Szenario 5: Kombination ... XXXI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Teufelskreis von Auto und öffentlichem Verkehr; eigene Darstellung nach (Ortúzar und Willumsen 2011) 6
Abbildung 2: Vierstufenmodell (Chasserieau und Goix 2019) 12
Abbildung 3: Quetzal Objektmodell (Chasserieau und Goix 2019) 14
Abbildung 4: Struktur Quetzal_Germany (Arnz 2022) 15
Abbildung 5: Aufschlüsselung der Netzwerkvorbereitung (Arnz 2022)..... 16
Abbildung 6: Netzwerkvorbereitung Quetzal_Flensburg; eigene Darstellung nach (Arnz 2022)..... 18
Abbildung 7: Zonen im Flensburger Modell 20
Abbildung 8: Fußgänger*innen Netzwerk 20
Abbildung 9: Modal Split Flensburg 2021 (Fahrten) [%]; eigene Darstellung nach Stadt Flensburg (2022) 21
Abbildung 10: Vergleich Modal Split (Fahrten) Stadt Flensburg (links) und Flensburger Modell (rechts) [%] 24
Abbildung 11: Vergleich Modal Split (Pkm) Stadt Flensburg (links) und Flensburger Modell (rechts) [%] 24
Abbildung 12: Modell Modal Split Fahrten (links) und Modal Split Pkm (rechts) im Segment ‚kein Auto' [%]..... 25
Abbildung 13: Ursprüngliches Straßennetz im Vergleich mit dem Straßennetz aus den Simulationen 4.A und 4.B 30
Abbildung 14: Modal Split Ticketbesitzer*innen nach Fahrten (links) und Pkm (rechts) [%] 32
Abbildung 15: Modal Split ohne Ticket nach Fahrten (links) und Pkm (rechts) [%] .. 33
Abbildung 16: Vergleich Modal Split Fahrten Basismodell (links) und Umweltverbund 2.A +100% (rechts) im Segment ‚Auto' [%] 34
Abbildung 17: Vergleich Modal Split Fahrten Basismodell (links) und Umweltverbund 2.B -100% (rechts) im Segment ‚Auto' [%] 35
Abbildung 18: Anteil der Verkehrsmodi am Modal Split Fahrten nach Änderung des ÖPNV Preises [%]..... 35
Abbildung 19: Anteil der Verkehrsmittel am Modal Split Pkm nach Änderung des ÖPNV Preises [%]..... 36
Abbildung 20: Anteil der Verkehrsmittel am Modal Split Fahrten nach Änderung der Fahrradgeschwindigkeit und des ÖPNV-Preises [%]..... 37
Abbildung 21: Anteil der Verkehrsmittel am Modal Split Pkm nach Änderung der Fahrradgeschwindigkeit und des ÖPNV Preises [%] 37
Abbildung 22: Vergleich Modal Split Fahrten Basismodell (links) und Autovermeidung (rechts) im Segment ‚Auto' [%]..... 39

Abbildung 23: Route des MIV von Zone 3 zu Zone 10 im Basisfall (links) und Szenario 4.B (rechts) 40
Abbildung 24: Modal Split Autofrei Fahrten [%] 40
Abbildung 25: Modal Split Fahrzweck Kombination, Autobesitz, autofreier Tag [%] 41
Abbildung 26: Modal Split Pkm Kombination, Autobesitz, autofreier Tag [%] 42
Abbildung 27: Vergleich Modal Split Fahrten Basismodell (links) und Kombination autofreie Innenstadt (rechts) im Segment ‚Auto' [%] 43
Abbildung 28: Modal Split Pkm Kombination autofreie Innenstadt im Segment ‚Auto' [%] 44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Dateninput für die Zonen 19
Tabelle 2: Übersicht der Input-Daten für das Basismodell 20
Tabelle 3: Übersicht der Szenarien 26
Tabelle 4: Übersicht der eingesetzten Parameter Szenario 2 29
Tabelle 5: Übersicht der eingesetzten Parameter Szenario 3 29
Tabelle 6: Übersicht der Simulationsdurchgänge von Szenario 5 31
Tabelle 7: Vergleich Modal Split Basismodell und Umweltverbund 2.A nach Steigerung der Fahrradgeschwindigkeit um +100% (Pkm) [%] 34
Tabelle 8: Vergleich der prozentualen Veränderung am Modal Split durch die Einführung der verschiedenen Maßnahmen [%] 38
Tabelle 9: Prozentuale Veränderung des Szenarios 1 durch Einfluss der weiteren Maßnahmen auf die Nutzung des 9€-Tickets in Szenario 5 autofreier Tag 43
Tabelle 10: Prozentuale Veränderung des Szenarios 1 durch Einfluss der weiteren Maßnahmen auf die Nutzung des 9€-Tickets in Szenario 5 autofreie Innenstadt 45
Tabelle 11: Ergebnisvergleich der Szenarien 2Mix, 3, 4.B. & 5.B [%] 46
Tabelle 12: Ergebnisvergleich der Szenarien 4.C & 5.A [%] 47

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ASC	Alternativspezifische Konstante
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
$CO_{2\text{-eq.}}$	Treibhauspotential bzw. CO_2-Äquivalent
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
GTFS	General Transit Feed Specification
KSG	Klimaschutzgesetz
LoS	Level-of-Service
MiD	Mobilität in Deutschland 2017
MIV	Motorisierter Individualverkehr
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OSM	OpenStreetMap
Pkm	Personenkilometer
THG	Treibhausgase
ZOB	Zentraler Omnibusbahnhof

1 Einleitung

Die in Deutschland durch den Verkehrssektor ausgestoßenen Treibhausgase lagen im Jahr 2018 bei 162 Mio. t CO_2-Äquvialenten ($CO_{2\text{-eq.}}$), dies entspricht etwa einem Fünftel der gesamten deutschen Emissionen (Umweltbundesamt 2022a). Im vergangenen Jahrzehnt sind die Emissionen nahezu unverändert geblieben und lagen z.B. im Jahr 2010 bei 153 Mio. t $CO_{2\text{-eq}}$. Im Jahr 2020 gab es eine Reduktion der Emissionen auf 146 Mio. t $CO_{2\text{-eq}}$. Dieser Rückgang ist auf den Einbruch in der Mobilität durch die COVID-19-Pandemie zurückzuführen (Statistisches Bundesamt 2022c).

Im Pariser Klimaabkommen von 2015 wird festgehalten, dass es essenziell ist die globale Erderwärmung im Vergleich zur vorindustriellen Zeit auf 1,5°C bis maximal 2°C zu begrenzen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2022). Damit sollen Folgen des anthropogenen Klimawandels wie Artensterben, Ansteigen des Meeresspiegels oder weiteren drastischen Klimaveränderungen (IPCC 2022) auf ein Minimum reduziert werden. Zur Erreichung der Klimaziele hat die Bundesregierung das Klimaschutzgesetz 2021 (KSG) verabschiedet, welches den politischen Weg bis zur Klimaneutralität im Jahr 2045 vorgeben soll (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2022). Dies bedeutet eine Minderung der CO_2-Emissionen für das Jahr 2030 um mindestens 65% und für das Jahr 2040 um mindestens 88% (gegenüber dem Jahr 1990). Neben dem Verkehrssektor müssen vor allem in den Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude sowie Landwirtschaft große Veränderungen stattfinden, da diese maßgeblich für die Emissionen verantwortlich sind.

Allein für den Verkehrssektor bedeutet dies, ausgehend von dem Jahr 2020, eine Reduktion um 61 Mio. t $CO_{2\text{-eq.}}$ bis zum Jahr 2030 und um weitere 85 Mio. t $CO_{2\text{-eq.}}$ bis zum Jahr 2045. Laut aktuellem Projektionsbericht der Bundesregierung werden ohne zusätzliche Maßnahmen die Emissionen des Verkehrssektors bis 2030 nur marginal auf 159 Mio. t $CO_{2\text{-eq.}}$ sinken (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2019).

Die zuletzt im Jahr 2017 durchgeführte Studie „Mobilität in Deutschland“ (MiD) ergab, dass sich das Verkehrsaufkommen[1] und die Verkehrsleistung[2] insgesamt gegenüber den Jahren 2002 und 2008 nur minimal verändert haben. Hierbei ist jedoch festzuhalten, dass die Studie hohe regionale Differenzen aufzeigt.

[1] Absolute Zahl oder prozentuale Aufteilung aller in einem bestimmten Zeitraum zurückgelegten Wege (Follmer und Gruschwitz 2019).

[2] Absolute Zahl oder prozentuale Aufteilung aller in einem bestimmten Zeitraum zurückgelegten Personenkilometer (Follmer und Gruschwitz 2019).

Insbesondere in Großstädten gab es einen massiven Anstieg des Verkehrsaufkommens und der Verkehrsleistung, was auf den dortigen Bevölkerungszuwachs zurückzuführen ist (Follmer und Gruschwitz 2019). Dem bundesweiten Modal Split (2017) zufolge, werden 22% der Wege ausschließlich zu Fuß, 11% mit dem Fahrrad und lediglich 10% mit öffentlichen Verkehrsmitteln zurückgelegt. 43% der Wege werden mit dem PKW bestritten und weitere 14% durch die PKW-Mitfahrenden. Motorisierter Individualverkehr (MIV) macht damit den höchsten Anteil aus und verzeichnete einen leichten Zuwachs im Vergleich zu den Jahren 2008 und 2002 (Follmer und Gruschwitz 2019). Dies spiegelt sich in der Gesamtzahl zugelassener Fahrzeuge wider. Mit rund 43 Mio. Fahrzeugen in privaten Haushalten verfügt statistisch gesehen jeder Haushalt über mehr als ein Fahrzeug (Follmer und Gruschwitz 2019). Hierbei steigt der Anteil an größeren PKWs im Bestand, wobei der durchschnittliche PKW-Besetzungsgrad seit 2002 mit etwa 1,5 Personen konstant geblieben ist.

Die Stadt Flensburg orientiert sich an den Plänen der Bundesregierung und hat sich zum Ziel gesetzt bis zum Jahr 2050 CO_2-neutral zu werden. Die Emissionen der Stadt lagen im Jahr 2016 bei ca. 769.000t $CO_{2\text{-eq.}}$ (Stadt Flensburg 2019). Die Verursacher lassen sich aufschlüsseln in Haushalte (34%), gefolgt von dem Mobilitätssektor (28%) sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (26%). Etwa 12% der Emissionen werden durch industrielle Produktion verursacht. Der Mobilitätssektor in der Stadt Flensburg ist einer der Hauptverursacher der Emissionen und hat prozentual betrachtet einen höheren Anteil an den lokalen Emissionen als der bundesdeutsche Mobilitätssektor an den Gesamtemissionen in Deutschland. Der Verkehrssektor in Deutschland war im Jahr 2016 für ca. 18% der gesamten Emissionen verantwortlich (Umweltbundesamt 2022a).

1.1 Problemstellung

Die Bundesregierung hat sich ambitionierte Klimaschutzziele gesetzt, doch liegen insbesondere im Verkehrssektor die erklärten Emissionsziele und die tatsächlich ausgestoßenen Treibhausgasemissionen noch weit auseinander. Innerhalb des letzten Jahrzehnts konnten die THG-Emissionen lediglich um ca. 7 Mio. t $CO_{2\text{-eq.}}$ gesenkt werden, wobei die COVID-19-Pandemie und damit einhergehende Ereignisse eine bedeutende Rolle bei der Verminderung spielten. Hierbei wird deutlich, dass der Verkehrssektor bei der Umsetzung klimapolitischer Maßnahmen im Vergleich zum Energiesektor eine untergeordnete Rolle spielt. Die Emissionen konnten seit 2010 von 368 Mio. t $CO_{2\text{-eq.}}$ auf 220 Mio. t $CO_{2\text{-eq.}}$ im Jahr 2020 gesenkt werden (Umweltbundesamt 2022a). Jeder Sektor erfordert individuelle Analysen,

jedoch verdeutlicht das stetige Wachstum des MIV die Notwendigkeit wirksame Maßnahmen für die Verwendung von emissionsarmen Alternativen umzusetzen. Daher ist es wesentlich auch bei der Mobilitätswende auf alle drei Strategien der Energiewende zu setzen: Effizienz, Konsistenz und Suffizienz.

Der Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2030 ist das wichtigste Instrument der Verkehrsinfrastrukturplanung in Deutschland und betrachtet einen Zeitraum von 10 bis 15 Jahren. Zukünftige verkehrsplanerische Vorhaben werden nach Kosten und Nutzen analysiert sowie umwelt- und naturschutzfachlich, raumordnerisch und städtebaulich beurteilt. Der Erhalt der Bestandsnetze sowie die Beseitigung von Engpässen auf Hauptachsen und in den wichtigsten Verkehrsknotenpunkten gehören zu den Kernanliegen des Plans (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2022). Dies soll die Staus auf Bundesfernstraßen verringern und die Kapazität von Personen- und Güterverkehr auf der Schiene steigern. Die Umgestaltung des bestehenden Verkehrsnetzes hin zur nachhaltigen Mobilität gehört nicht zu den Kernanliegen.

Zukünftig soll laut Koalitionsvertrag 2021 nachhaltige, barrierefreie, innovative und für alle Bundesbürger alltagstaugliche sowie bezahlbare Mobilität ermöglicht werden. Das Ziel soll vor allem durch innovative Maßnahmen und den Ausbau des Infrastrukturnetzes erreicht werden. Beispiele hierfür sind der Ausbau der Elektromobilität und Ladeinfrastruktur für PKW, der Ausbau und die Modernisierung der Infrastruktur inklusive der Weiterentwicklung von Mobilitätsangeboten, Investitionen und Elektrifizierung innerhalb des Schienenverkehrs sowie die Verbesserung von Attraktivität und Kapazität des ÖPNVs (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2021). Es ist erkennbar, dass besonders die Strategie der Konsistenz, aber auch die der Effizienz von der Bundesregierung gefördert wird. Dabei kann das Voranbringen von Suffizienz Maßnahmen Ressourcen schonen und die ausgestoßenen Emissionen mindern. Anhand der ausgestoßenen Emissionen innerhalb der letzten Jahre wird deutlich, dass die bisher ergriffenen Maßnahmen nicht ausreichend sind, um Klimaneutralität im Verkehrssektor im vorgesehenen Zeitraum bis zum Jahr 2045 zu erreichen.

Dieser bundesweite Trend ist ebenfalls in der Stadt Flensburg festzustellen. Zwar konnte im Jahr 2016 eine Reduktion der CO_2-Emissionen um 27% gegenüber dem Jahr 1990 erzielt werden, allerdings fand im Verkehrsbereich faktisch bisher keine Reduktion der Emissionen statt (Stadt Flensburg 2019). Die bisher umgesetzten Maßnahmen zur Emissionsreduzierung in diesem Bereich scheinen demnach nicht ausreichend, um eine nachhaltige Veränderung zu erreichen.

Eine weitere Herausforderung der Verkehrswende ist, dass sich Angebot und Nachfrage der Mobilität je nach Urbanität einer Region stark unterscheiden (Follmer und Gruschwitz 2019). Diese Differenzen sorgen dafür, dass nicht jede Maßnahme überall gleich wirksam ist, sondern im Vorhinein anhand von regionalen, soziographischen und infrastrukturellen Merkmalen geprüft werden muss. So könnte eine Erhöhung des Kraftstoffpreises dafür sorgen, dass in städtischen Regionen mehr Menschen den ÖPNV nutzen. In ländlichen Regionen ist dieser teilweise nicht existent, sodass diese Option entfällt und stattdessen die soziale Ungleichheit verstärkt werden würde. Ein vorheriger Ausbau der ÖPNV-Infrastruktur könnte hier entgegenwirken. Es müssen demnach mehrere Maßnahmen parallel umgesetzt werden, die einander im besten Fall stark positiv beeinflussen und auf die entsprechende Region angepasst sind. Für eine erfolgreiche und nachhaltige Planung der Mobilität ist Verkehrsmodellierung ein essenzielles Instrument.

Der hohe Stellenwert des PKW in Deutschland, sowohl wirtschaftlich als auch sozial, verstärkt die Hürde für einen strukturellen Mobilitätswandel. Der MIV macht nicht nur den größten Anteil des deutschen Modal Splits aus, sondern ist mit knapp 15.000kt $CO_{2\text{-eq.}}$ ebenfalls Hauptverursacher der THG-Emissionen im Verkehrssektor (Umweltbundesamt 2022b). Hinzu kommt, dass Deutschland international zu den führenden Kraftfahrzeugproduzenten gehört und sich somit eine Verschiebung des Modal Split hin zu emissionsfreien Mobilitätsarten schwer gestalten lässt.

Es ist festzuhalten, dass es behördliche Pläne in Richtung nachhaltige Mobilität gibt, deren Umsetzung jedoch noch am Anfang steht. Viele der Maßnahmen sind wenig spezifisch und oftmals noch ohne Praxisbezug konzipiert. Außerdem zielen die Maßnahmen eher auf einen Technologiewechsel anstatt auf einen grundliegenden Wandel der Mobilität ab. Ein derartiger struktureller Wandel würde langfristig nachhaltiger sein.

1.2 Forschungsstand Transportmodellierung

In der Mobilität tauchen regelmäßig alte und nicht bewältigte Probleme wieder auf, häufig in neuen, komplexeren Formen. Der Anstieg an Straßenverkehr und Transportnachfrage führt zu Staus, Verspätungen, Unfällen und Umweltproblemen wie z.B. Luftverschmutzung. Zusätzlich übersteigt das Wirtswachstum die Kapazitäten der Transporteinrichtungen (Ortúzar und Willumsen 2011). Die Ressourcen sind jedoch limitiert, sodass Transportplanung notwendig ist, um die Vorteile zu maximieren und die Kosten zu minimieren.

Verkehrsmodelle sind ein wichtiges Instrument der Verkehrsplanung und unterstützen besonders in Entscheidungsprozessen. Sie sind eine vereinfachte Repräsentation eines Teils der realen Welt und dienen als die wissenschaftliche Grundlage der Verkehrsplanung. Ein Modell wird stets auf einen bestimmten Gesichtspunkt fokussiert und ist daher nur aus einer bestimmten Perspektive realistisch (Ortúzar und Willumsen 2011). Generell kann man Modelle in physische und abstrakte Modelle unterscheiden, wobei Verkehrsmodelle durch ihren mathematischen Hintergrund üblicherweise zu den letzteren gehören.

Vekehrsnachfrage ist eine abgeleitete Größe und kein Selbstzweck, d.h. dass die Menschen mobil sind, um ihren Bedürfnissen (Arbeit, Freizeit, Gesundheit) und Aktivitäten an bestimmten Orten nachzugehen. Dadurch bildet die Nachfrage das Mobilitätsverhalten ab und muss somit im urbanen sowie regionalen Kontext als die Verteilung der Aktivitäten über den Raum verstanden werden (Ortúzar und Willumsen 2011). Die Nachfrage nach Transportservice ist differenziert und qualitativ, da es viele spezifische Anforderungen an den Verkehr gibt, je nach Tageszeit, Wochentag, Bedeutung von Geschwindigkeit, etc.

Das **Verkehrsangebot** muss zu der Zeit konsumiert werden, zu der es produziert wird und kann nicht gelagert werden. Um wenig Ressourcen zu verwenden, muss die Nachfrage so akkurat wie möglich bestimmt werden. Für ein breites Verkehrsangebot muss entsprechende Transportinfrastruktur bereitstehen, wobei die Trennung von Lieferanten der Infrastruktur und Anbietern der finalen Transportservices zu einem komplexer Menge von Interaktionen zwischen Regierungen, Bauarbeiter*innen, Entwickler*innen, Betreiber*innen, Reisenden und der generellen Bevölkerung führt (Ortúzar und Willumsen 2011). Damit entspricht das Angebot den Verkehrsnetzen. Die **Level-of-Service Attribute** (LoS) wie z.B. Reisezeit und -kosten, Verlässlichkeit oder Anschlussmöglichkeiten legen den systematischen Nutzen bzw. Nichtnutzen der verschiedenen Verbindungen fest (Arnz 2022).

Sowohl Verkehrsangebot als auch -nachfrage haben starke dynamische Elemente. Zu bestimmten Tageszeiten kommt es zu spezifischen Spitzenlasten (peak period), in denen Systeme, die auf einer durchschnittlichen Nachfrage beruhen, nicht mithalten können. Für die Transportplanung gilt es die Zufriedenheit einer bestimmten Nachfrage für Personen- und Güterbewegung mit verschiedenen Fahrtenzwecken, zu verschiedenen Tageszeiten des Jahres, mit verschiedenen Modi innerhalb eines gegebenen Transportsystems (mit bestimmter Handlungskapazität) sicherzustellen.

Mittels einfacher Ursache-Wirkungs-Beziehungen können einige Verkehrsprobleme grafisch dargestellt werden. Wie in Abbildung 1 nach Ortúzar und Willumsen dargestellt, kann ein erhöhtes Wirtschaftswachstum zu einem Teufelskreis zwischen Auto und dem öffentlichen Verkehr führen.

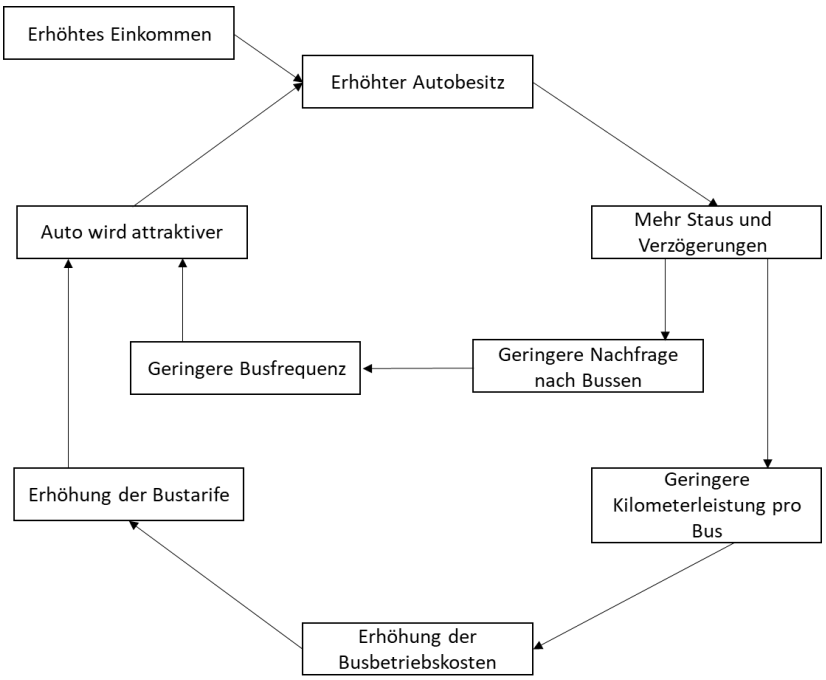

Abbildung 1: Teufelskreis von Auto und öffentlichem Verkehr; eigene Darstellung nach (Ortúzar und Willumsen 2011)

Mehr Wirtschaftswachstum führt zu einem erhöhten Autobesitz. Dieser verursacht, dass die Menschen weniger mit dem ÖPNV unterwegs sind, was zu einer Reduktion der Fahrgäste und daher einer Preissteigerung bzw. einer Frequenzminderung führt. Auf diese Weise wird die Autonutzung attraktiver gegenüber dem ÖPNV. Langfristige Effekte sind z.B. ein erhöhtes Stauaufkommen, welches häufig mit Verspätungen der Busse einhergeht oder die Entkopplung von Arbeits- und Wohnort, da Autobesitzer*innen bei der Standortwahl keine Rücksicht auf die Verfügbarkeit vom ÖPNV nehmen müssen. Die Autoren weisen auf verschiedene Maßnahmen zum Durchbrechen des Teufelskreises hin, wie z.B. Subventionen, Internalisierung der externen Effekte oder bauliche Begrenzungen. Verkehrsmodelle bilden dabei eine solide Grundlage, da diese nicht nur helfen Probleme zu identifizieren, sondern auch spezifisch angepasste Lösungsansätze bereitstellen. Die identifizierten Probleme und Lösungsansätze können politischen Entscheidungsträgern weitergegeben und entsprechend verwendet werden.

Deutschlandweit gibt es verschiedene Transportmodelle, die sich anhand der verschiedenen Herangehensweisen und Fragestellungen unterscheiden.

1.2.1 Mikroskopische Verkehrsmodelle

Mikroskopische Verkehrssimulation liefert den höchsten Detaillierungsgrad, da hier die individuelle Bewegung aller Verkehrsteilnehmer sowie die Interaktionen untereinander betrachtet werden. Der Ablauf der Bewegungen ergibt sich aus den individuellen Entscheidungen aller, wobei die Abbildung der Bewegungen räumlich und zeitlich kontinuierlich erfolgt (Baur 2015). Es kann grundsätzlich unterschieden werden in Modelle für Längs- und Querdynamik. Hierbei stellt Längsdynamik das Verhalten und Fahren auf freier Strecke dar und Querdynamik das Wechseln der Fahrstreifen.

Erste Fahrzeugfolgemodelle aus den 1950er Jahren von u.a. Reuschel und Gazis et al. (vgl. (Baur 2015) beschreiben die Längsdynamik allein durch den geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstand, der später durch eine zusätzliche Sensitivitätsanalyse ergänzt wurde. Ausgehend von diesen Modellen wurde die Modellierung des Verhaltens weiterentwickelt, insbesondere bei freier Fahrt sowie bei der Interaktion zweier Fahrzeuge, inklusive spezifischer Rahmenbedingungen. Das Modell nach Gipps von 1981 (vgl. (Baur 2015) bestimmt die Randbedingungen zwischen zwei Fahrzeugen, z.B. die Minimal- bzw. Maximalwerte für die Beschleunigung und Bremsung. Hält jedes Fahrzeug die ermittelte ‚sichere Geschwindigkeit' ein, wird bei ausschließlicher Betrachtung der Längsdynamik in allen Verkehrssituationen eine Kollision verhindert. Das Modell nach Gipps gilt aufgrund seiner leichten Umsetzbarkeit und der realistischen Ergebnisse als robustes Modell, welches zudem auch die Grundlage verschiedener Simulationswerkzeuge wie z.B. AIMSUN[3] bildet.

Da der Verkehrsablauf durch das Verhalten der Fahrer und die Fahreigenschaften der Fahrzeuge beeinflusst wird, sind Verhaltensmodelle oft mit Verkehrsmodellen verknüpft. 1963 wurde dieser Zusammenhang erstmals von Todosiev beschrieben und elf Jahre später von Wiedemann in ein Modell übertragen, welches die Simulation des menschlichen Fahrverhaltens im Straßenverkehr und die daraus hervorgehenden Interaktionen beinhaltet (Baur 2015). Weidemann definiert drei verschiedene Fahrzustände, die von der aktuellen Fahrgeschwindigkeit und dem Abstand zum nächsten Fahrzeug abhängig sind. Sein Modell bildet die Grundlage für die Entwicklung des heute weltweit verwendeten Simulationswerkzeug VISSIM[4].

Die Darstellung der der einzelnen Verkehrsteilnehmer mit spezifischen Eigenschaften macht die mikroskopische Simulation sehr detailreich. In der

[3] Softwarepaket zur mikroskopischen Simulation des Verkehrs der Firma TSS (Baur 2015).
[4] Verkehr In Städten SIMulation; Softwaresimulationen im Verkehr der Firma PTV, mit der Möglichkeit komplexe Netzgeometrieren und Nachfrageszenarien abzubilden (Baur 2015).

Vergangenheit wurde daher häufig mit dem Ansatz der zellulären Automaten modelliert. Nach diesem Ansatz werden Zeit und Raum diskret betrachtet und Modelle wie z.B. das Nagel-Schreckenberg-Modell (Ocker 2020) stellen ausschließlich eine segmentierte Strecke dar. In jedem Segment kann sich entweder ein oder kein Auto befinden und durch die Annahme der Kollisionsfreiheit können trotz der Einfachheit relevante Verkehrsgrößen simuliert werden.

In größeren, neueren Modellen ist es nicht notwendig den Raum zu diskretisieren. Bei diesen agentenbasierten Modellen agieren die Verkehrsteilnehmer oder ‚Agenten' als selbstständige Einheit, verfügen über persönliche Eigenschaften und reagieren auf ihre Umwelt (Ocker 2020). Jeder Agent berechnet mittels mathematischer Gleichung seine Geschwindigkeit und den notwendigen Abstand, sodass diese bspw. zwischen zwei Autos variieren können. Dies gestaltet den Agenten flexibel, sodass es ihm im Gegensatz zum zellulären Ansatz auch möglich ist, das Verkehrsmittel zu wechseln.

Am Institut für Verkehrsforschung des DLR wird weitgehend an unserer Mobilität geforscht. Dies umfasst u.a. das Mobilitäts- und Verkehrsverhalten von Personen in privaten Haushalten und Unternehmen, Modellierungen zur Abbildung und Prognose der Verkehrsnachfrage oder die Nutzungspotentiale von Elektromobilität (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. 2021c). Aktuell verwendete mikroskopische Verkehrsmodelle sind z.B. CURRENT und TAPAS. CURRENT ist ein Akronym für „charging infrastructure for electric vehicles analysis tool" und ermittelt neben zeit- und ortsspezifischen Informationen die stündliche Stromnachfrage sowie den Ladebedarf von Elektroautos (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. 2021b). Das Modell TAPAS (steht für „travel and activity patterns simulation") hingegen liefert Daten zur zukünftigen Entwicklung der Personenverkehrsnachfrage in urbanen Räumen sowie Fahrtenlisten (Start, Ziel, Distanz, Zweck etc.) für einzelne Mitglieder der synthetischen Modellbevölkerung. Auf diese Weise können Auswirkungen sehr unterschiedlicher verkehrlicher und verkehrspolitischer Maßnahmen wie auch die der soziodemografischen Entwicklung prognostiziert werden (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. 2021d). Beide Modelle sind essenziell, um Prognosen oder Szenarien für die zukünftige Mobilität zu erhalten.

1.2.2 Makroskopische Verkehrsmodelle

Makroskopische Modelle beschreiben die Gesamtsicht auf den Verkehr. Dieser wird bspw. als Partikelsystem beschrieben, wobei die Straßen über eine bestimmte Kapazität verfügen und die Verkehrsteilnehmer als Partikel mit bestimmter Größe durch dieses System geleitet werden (Ocker 2020). Der Verkehrsfluss entsteht durch

die Interaktion der Einheiten miteinander und ihrer Umwelt. Ein Fokus liegt auf der Betrachtung des Gesamtsystems, sodass Phänomene wie z.B. ein Spurwechsel nicht abgebildet werden. Neben dem Verkehrsfluss ist der Verkehrsablauf eine entscheidende Information solcher Modelle.

Das ANTMOD („agile national transport model“) vom DLR ist an ein makroskopisches Vier-Stufen-Modell (siehe Kapitel 2.1.1) angelehnt und durchläuft davon die Stufen der Verkehrserzeugung, der Verkehrsmittelwahl und der Zielwahl (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. 2021a). Es ist ein agentenbasiertes Verkehrsnachfragemodell für den Personenverkehr in Deutschland. Durch die Agenten erfolgt eine hohe Differenzierung nach z.B. Personen-, Haushalts- oder Mobilitätsmerkmalen. Statt einer räumlich detaillierten Modellierung, erfolgt eine detaillierte Entfernungswahl für jeden Weg in Abhängigkeit der Raumkategorie des Startpunktes, wobei zwischen urban, suburban und ländlich unterschieden wird. Mit relativ geringem zeitlichem Aufwand können so zentrale Kenngrößen der Verkehrsforschung sowie Einschätzungen über die Wirkung verschiedener Politikmaßnahmen ermittelt werden.

1.2.3 Mischformen und weitere Modelle

Neben der mikroskopischen und der makroskopischen Modellierung gibt es weitere Betrachtungsskalen und Mischformen. Zu den wichtigsten gehören die mesoskopische sowie die nanoskopische Modellierung (Baur 2015). Bei der mesoskopischen Simulation werden Elemente der mirko- und makroskopischen Modellierung miteinander verknüpft. Modelle haben beispielsweise einen geringeren Detaillierungsgrad als bei der mikroskopischen Simulation, wodurch sich der gesamte Prozess effizienter gestalten lässt oder größere Regionen abgebildet werden können. Auf der anderen Seite basiert die Simulation auf einzelnen Verkehrsteilnehmer*innen, indem diese z.B. durch die Verkehrsdichte oder mittlere Geschwindigkeit aggregiert werden (PTV Planung Transport Verkehr GmbH 2022). Von einer nanoskopischen Modellierung spricht man, wenn für die einzelnen Fahrzeuge neben den Bewegungskenngrößen wie Geschwindigkeit oder Beschleunigung auch die zugrunde liegende Fahrzeugdynamik analysiert wird. Demnach werden z.B. auch der Einfluss des Lenkwinkels und die Auslegung des Antriebstrangs betrachtet (Baur 2015). Eine solche Modellierung ist vor allem für Untersuchungen neuer Fahrerassistenzsysteme relevant.

Neben den wichtigsten und eben genannten Modellformen gibt es verschiedene weitere Varianten, die sich teilweise überschneiden. Insgesamt ist für jedes Modell wichtig welchen Zweck es verfolgt und was untersucht wird, da dies entscheidend für die Auswahl der Modellart ist. In Deutschland gibt es verschiedene Modelle, die

unser zukünftiges Mobilitätsverhalten analysieren und Prognosen erstellen. Je detaillierter ein Modell ist, desto mehr Rechenleistung erfordert es. Daher ist es sinnvoll neben deutschlandweiten Modellen auch kleinere Modelle anzuschauen. Sofern es regionale Modelle gibt, können viel spezifischere Daten verwendet werden und Simulationen geben ein akkurateres Resultat wieder. Ein Verkehrsmodell für die Stadt Flensburg kann auf diese Weise politisch auf regionaler Ebene verwendet werden und Ergebnisse liefern, die für die Stadt konkret am sinnvollsten sind. Wohingegen ein nationales Modell aus einer weiteren und aus Flensburger Sicht weniger detaillierten Ebene Ergebnisse liefert.

1.3 Fragestellung und Zielsetzung

Die Stadt Flensburg hat sich Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 zum Ziel gesetzt. Seit der Festlegung des Ziels ist im Verkehrssektor jedoch keine nennenswerte Emissionsreduktion erzielt wurden. Aus dem Sektor gehen über ein Viertel der gesamten Emissionen hervor, sodass die Notwendigkeit und das Potential für Veränderung zu einem klimaneutralen Weg gegeben sind.

Klimapolitikmaßnahmen können aufgrund der unterschiedlichen Ausgangssituation an verschiedenen Orten anders wirken. Daher soll in dieser Arbeit analysiert werden welche Auswirkungen bekannte Maßnahmen für den Verkehrssektor auf die Stadt Flensburg haben. Welche Maßnahmen eignen sich besonders gut und in welchem Grad müssten diese umgesetzt werden, um tatsächliche Veränderung im Mobilitätsverhalten hervorzurufen? Inwiefern beeinflussen sich die verschiedenen Maßnahmen und können Synergieeffekte genutzt werden? In einem zweiten Schritt soll der Frage nachgegangen werden, welche weiterführenden Effekte nach einer Entwicklung zur klimaneutralen Mobilität erkennbar wären. Anhand der Maßnahmenauswahl sollen die qualitativen Effekte abgeleitet werden. Dazu gehören Veränderung in Bereichen wie z.B. Raumwahrnehmung, Raumnutzung, Lärm, Luftqualität, Lebensqualität, Verkehrssicherheit oder gesellschaftliche Strukturen. Eine genauere Beurteilung würde jedoch den Rahmen dieser Thesis sprengen, da hierzu Langzeitbetrachtungen sowie gemessene Daten notwendig wären.

Insgesamt soll die Analyse deutlich machen, ob und welche der bekannten Klimapolitikmaßnahmen für den Verkehrssektor notwendig werden, um eine klimaneutrale Stadtmobilität voranzutreiben. Es soll auch hervorgehen welche Effekte eine Implementierung mit sich bringen würde, sowohl für das Mobilitätsverhalten aber auch in Bezug auf die Lebensqualität der Stadt.

2 Methodik und Theorie

Um herauszufinden welche Maßnahmen sich besonders eignen und welche Effekte sie haben, wird ein Verkehrsmodell verwendet. Wie in Kapitel 1.2 erläutert sind Verkehrsmodelle ein wichtiges Instrument, um Prognosen zu erstellen und sie können die Basis für politische Entscheidungen bilden. Das Modell basiert überwiegend auf dem bestehenden Modell Quetzal_Germany (Arnz 2022), welches teilweise erweitert und an die spezifischen Gegebenheiten in der Stadt Flensburg angepasst wurde. Dieses angepasste Modell soll möglichst genau den Status quo der Verkehrssituation in Flensburg wiedergeben und bildet das Basismodell. Ausgehend von diesem Modell werden die verschiedenen Maßnahmen einzeln sowie gleichzeitig eingearbeitet, um verschiedene Effekte erkennen zu können. In Kapitel 2.1 werden die Grundlagen des Quetzal_Germany-Modells erläutert. Damit das Modell möglichst genau den Status quo der Stadt Flensburg widerspiegelt, werden ortsspezifische Daten eingearbeitet. Neben sozialdemographisch und verkehrsspezifischen Daten der Stadt Flensburg selbst wird auf die von der Nachwuchsforschungsgruppe „EnSu – Die Rolle von Energiesuffizienz in Energiewende und Gesellschaft“ durchgeführte Mobilitätsumfrage Bezug genommen, welche unter anderem im Zusammenhang mit dieser Arbeit durchgeführt wurde (vgl. Kapitel 2.3). Die Anpassung des Modells an die Stadt Flensburg sowie die Systemgrenzen werden in Kapitel 2.2 ausgeführt. Für die Auswahl der Maßnahmen und der daraus resultierenden Szenarien für die Mobilität in der Stadt wird sich zum einen an den geplanten Maßnahmen der Mobilitätswende in Flensburg orientiert, aber auch an aktuell diskutierten Maßnahmen, um ihre Wirkung zu analysieren. Insgesamt liegt der Fokus auf Maßnahmen, welche das Ziel einer nachhaltigen Stadtmobilität verfolgen. Die Beschreibung der Szenarien und ihre Umsetzung im Modell werden in Kapitel 3 erläutert. Die verschiedenen Szenarien werden durch das Flensburger Modell simuliert. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4 beschrieben, wobei die exakten Zahlenwerte und ausführlichen Ergebnisse von jeder Simulation im Anhang gelistet sind. Da jedes Szenario verschiedene Maßnahmen betrachtet, werden diese zusätzlich gegenübergestellt. Auf diese Weise soll die Bedeutung der einzelnen Szenarien für ein Voranbringen von nachhaltiger Mobilität herausgestellt werden. Anhand der Ergebnisse sollen die resultierenden Veränderungen qualitativ herausgestellt werden. Dazu werden die Bereiche Emissionen, Raumnutzung und Lebensqualität sowie Verkehrssicherheit betrachtet. Die gesammelten Ergebnisse werden in Kapitel5 diskutiert und interpretiert. Kapitel 6 ist eine Zusammenfassung der gesamten Arbeit.

2.1 Modellgrundlage Quetzal_Germany

Die Basis für das Flensburger Verkehrsmodell bildet das makroskopische Personenverkehrsmodell Quetzal_Germany für die Region Deutschland. Es ist ein Open-Source-Projekt und unterstützt die Forschung zur Entwicklung eines integrierten erneuerbaren Energiesystems mit Erkenntnissen zum Mobilitätsverhalten (Arnz 2022). Die Methode des Modells basiert auf der klassischen vierstufigen Verkehrsmodellierung. Bei dieser Form der Modellierung liegt der Schwerpunkt auf der Verkehrsmittelwahl, welche durch ein zwecksegmentiertes Logit-Modell angewandt wird. Quetzal_Germany verwendet den Transportmodellierungsrahmen Quetzal, welcher für die Stadt Paris entwickelt wurde. Durch das freie Python-Paket können flexible Modelle für die Verkehrsplanung bereitgestellt werden. Die erste zugängliche Version wurde im Jahr 2018 veröffentlicht, wobei seit 2016 an Quetzal gearbeitet wird (Chasserieau und Goix 2019).

2.1.1 Vierstufige Verkehrsmodellierung

Für die Modellierung des Verkehrs wird in den Quetzal-Modellen eine Abfolge von Verfahren, die auch ‚Schritte' genannt werden, durchgeführt. Das vierstufige Modell basiert auf den Methoden Verkehrserzeugung (Generation), Verkehrsverteilung (Distribution), Modal Split und Verkehrszuweisung (Assignment) und ist in Abbildung 2 zu sehen (Chasserieau und Goix 2019).

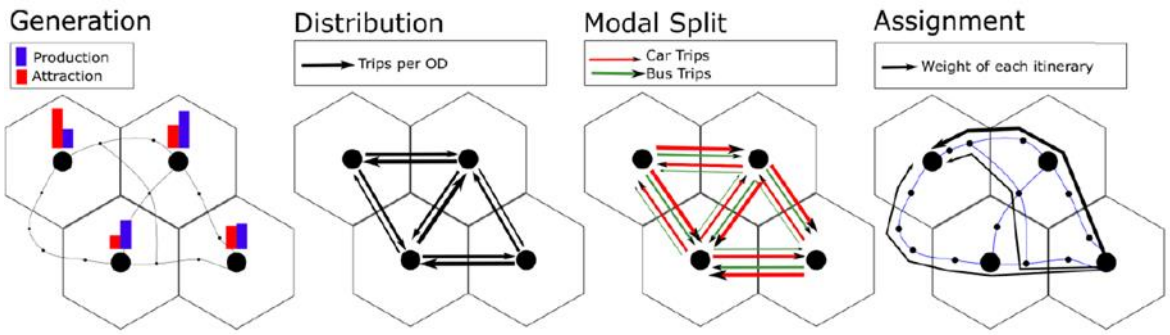

Abbildung 2: Vierstufenmodell (Chasserieau und Goix 2019)

Die Modellierung der Erzeugung ist der erste Schritt bei der Erstellung einer Prognose zur Verkehrsnachfrage und wichtig für die Bewertung der verkehrlichen Auswirkungen von Flächennutzungsentwicklungen. Das Gebiet wird in verschiedene Verkehrsanalysezonen unterteilt und mit Daten zur Fahrtenerzeugung hinterlegt. Diese Daten basieren u.a. auf Erhebungs-, Flächennutzungs- und sozioökonomischen Daten. Für das Flensburger Modell wurden diese Daten von der Stadt Flensburg bezogen. Das Quetzal_Modell generiert daraus die ‚Production' und ‚Attraction', welche die Aussendungen bzw. die Anziehungskraft für die verschiedenen Zonen darstellt. Innerhalb des Verkehrserzeugungsschrittes wird im

Quetzal-Modell keine spezifische Quetzal-Methode benötigt, sondern roher Python-Code verwendet.

Der Schritt Verkehrsverteilung verwendet die Ergebnisse aus der Verkehrserzeugung als Input. In einem speziellen Modul von Quetzal werden die ‚Production' und ‚Attraction' neben einer Impedanzmatrix in einem doppelt eingeschränkten, sich schrittweise wiederholenden Algorithmus verwendet (Chasserieau und Goix 2019). Aus den ersten beiden Schritten entsteht eine Nachfragematrix (demand matrix) sowie eine Start-Ziel-Matrix (origin-destination matrix). Dadurch werden die neuen Fahrten widergespiegelt, welche durch die Bevölkerung, Beschäftigungsrate und andere demografische Veränderungen verursacht werden.

Im Modal Split wird bestimmt auf welche Art und Weise die Wege durchgeführt werden. Diese Aufteilung geschieht in Quetzal durch sogenannte Pfadfinder (pathfinder) die durch ein Logit-Modell gewichtet sind (Chasserieau und Goix 2019). Die Fahrtzuweisung oder Routenwahl betrifft die Auswahl von Routen zwischen den Ursprungspunkten und den Zielen innerhalb der Verkehrsnetze. Der Pfadfinder sucht stets nach der schnellsten Verbindung zwischen Start und Ziel. Die Analyse der Verkehrsmittelwahl gibt Aufschluss darüber, welches Verkehrsmittel von welchen Reisenden genutzt wird. Sobald die Anzahl der Reisenden pro Strecke und Verbindung des Netztes bekannt sind, können der Bedarf an Einrichtungen, die Kosten und der Nutzen bestimmt werden.

Der letzte Schritt ist die Verkehrszuweisung. Die Start-Ziel-Relationen werden hier mit den Prozenten der Verkehrsmittelwahl verknüpft. Durch eine implementierte Rückkopplungsschleife wird überprüft und verhindert, dass es in den Verkehrsnetzen zu einer Überlastung kommt. Im Quetzal-Modell werden in dem Verknüpfungsschritt die einzelnen Komponenten zusammengetragen. Dazu gehören die Aufzählung der durch den Pfadfinder-Algorithmus ermittelten Pfade, deren unterschiedliche Gewichtung durch das Logit-Modul sowie die Kombination aus dem Gewicht der Pfade und der Belastung der entsprechenden Start-Ziel-Relation (Chasserieau und Goix 2019).

2.1.2 Quetzal

Quetzal ist eine Python-Bibliothek und muss deswegen über Programmierskripte verwendet werden, dabei wird Jupyter Notebook von den Programmierern empfohlen (Chasserieau und Goix 2019). Dies bedeutet, dass das Quetzal-Modell als organisierte Reihe von Skripten definiert wird, die mehrere und verschiedene Datenreihen lesen sowie exportieren. Um dann die verschiedenen Ressourcen zu

nutzen, können im Skript verschiedene Teile der Quetzal-Bibliothek importiert werden. Der Export der Inhalte erfolgt über gezippte HDF5-Dateien (Binärdatei) oder als JSON-Dateien. Das Besondere an Quetzal ist, dass es die einzige Open-Source-Software für die makroskopische Transportmodellierung ist. Es können Algorithmen implementiert werden, die auf frei verfügbare Daten wie z.B. OpenStreetMap (OSM) zugreifen. Quetzal verfügt über eine umfangreiche Toolbox, welche u.a. eine automatische Konsistenzprüfung von Fahrplänen enthält, und kann daher als flexibles und autarkes Modellierungssystem verwendet werden (Chasserieau und Goix 2019). Die Objektstruktur des Modells ist in Abbildung 3 zu sehen.

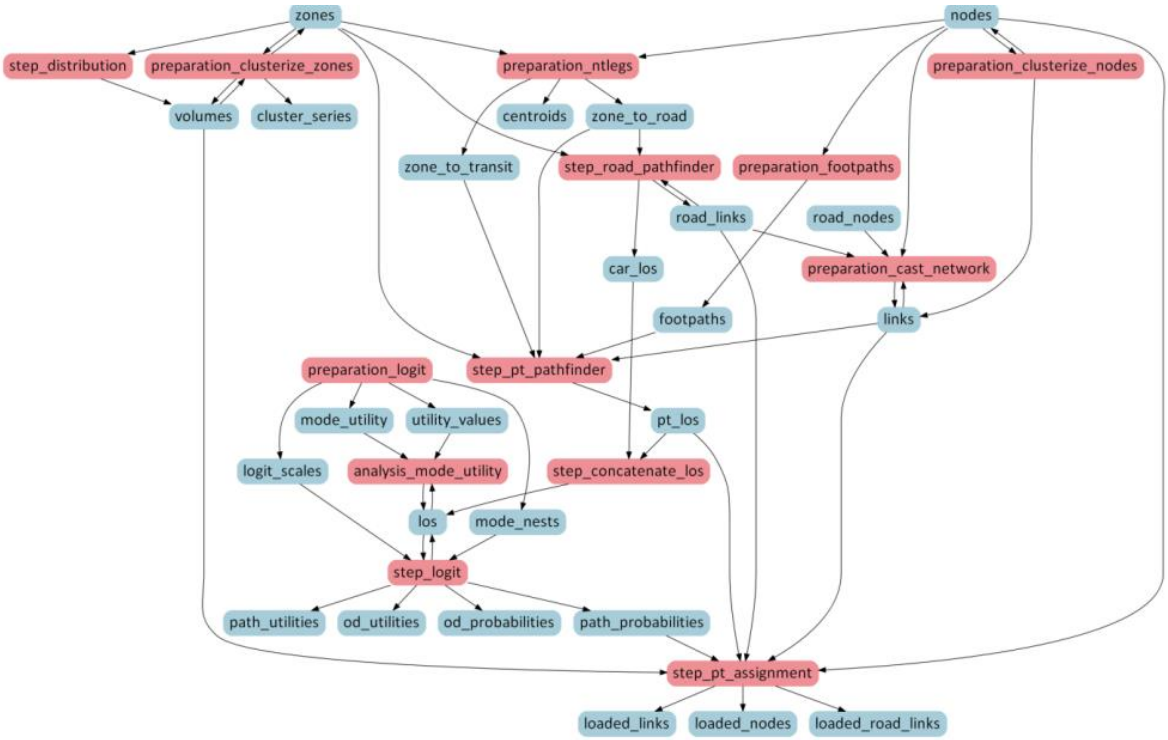

Abbildung 3: Quetzal Objektmodell (Chasserieau und Goix 2019)

Die Abbildung zeigt für jede Methode (rot) die erforderlichen Attribute und die zu erwartenden Produkte. In blau abgebildet sind die Datenrahmen, die mit Hilfe der Programmierbibliothek Pandas erstellt werden, wie z.B. die Verkehrszonen, Volumen oder die Start-Ziel-Matrix (Chasserieau und Goix 2019). Sofern ein neues Projekt entworfen wird, bewegt man sich durch dieses Netzwerk. Ausgehend von den verfügbaren Daten werden dem Objekt verschiedene Attribute hinzugefügt, bis das Ziel (unten rechts) wie bspw. „loaded_road_links“ erreicht ist. Die vier Schritte sind auch in Abbildung 3 wiederzufinden. Die ersten beiden Schritte Verkehrserzeugung (Generation) und Verkehrsverteilung (Distribution) sind in der Abbildung im oberen Bereich zu sehen. Sie sind für die Erzeugung der ursprünglichen Zielmatrix zuständig, wofür die zonenspezifischen Informationen benötigt werden. Ein zu erwartendes Produkt sind z.B. die Volumina. Der Schritt der Verkehrsmittelwahl

(Modal Split) ist im unteren Bereich zu erkennen und wird mit multinominalen bzw. verschachtelten (nested) Logit-Modellen durchgeführt. Hierfür werden verschiedene Skalen (logit_scales), Nutzen (utility) usw. benötigt, um den Nutzen der verschiedenen Pfade oder Ziele mit den jeweiligen Wahrscheinlichkeiten (probabilities) zusammenzuführen. Die Skalen z.B. stellen die Attraktivität bzw. einen Nutzenmaßstab dar (Chasserieau und Goix 2019). Im letzten Schritt werden die Netzwerkverbindungen mit den Volumina zusammengebracht, welcher in der Abbildung im untersten roten Feld zu finden ist.

2.1.3 Modellstruktur Quetzal_Germany

Das von Arnz entwickelte Modell Quetzal_Germany (Arnz 2022) beruht auf dem Quetzal-Modell von Quentin Chasserieau und Robin Goix und bildet den Verkehr in Deutschland ab. Die Funktionsweise ist demnach ähnlich wie die des ursprünglichen Modells, wobei es auf die spezifischen Informationen zur Mobilität in Deutschland angepasst wurde. Die Anpassung ist in Abbildung 4 zu erkennen. Die wichtigsten Modellierungsschritte sind in hellblau eingezeichnet. Die Pfeile mit Beschriftung signalisieren den Datenaustausch zwischen den einzelnen Schritten. Die Input-Daten sind gestrichelt umrandet.

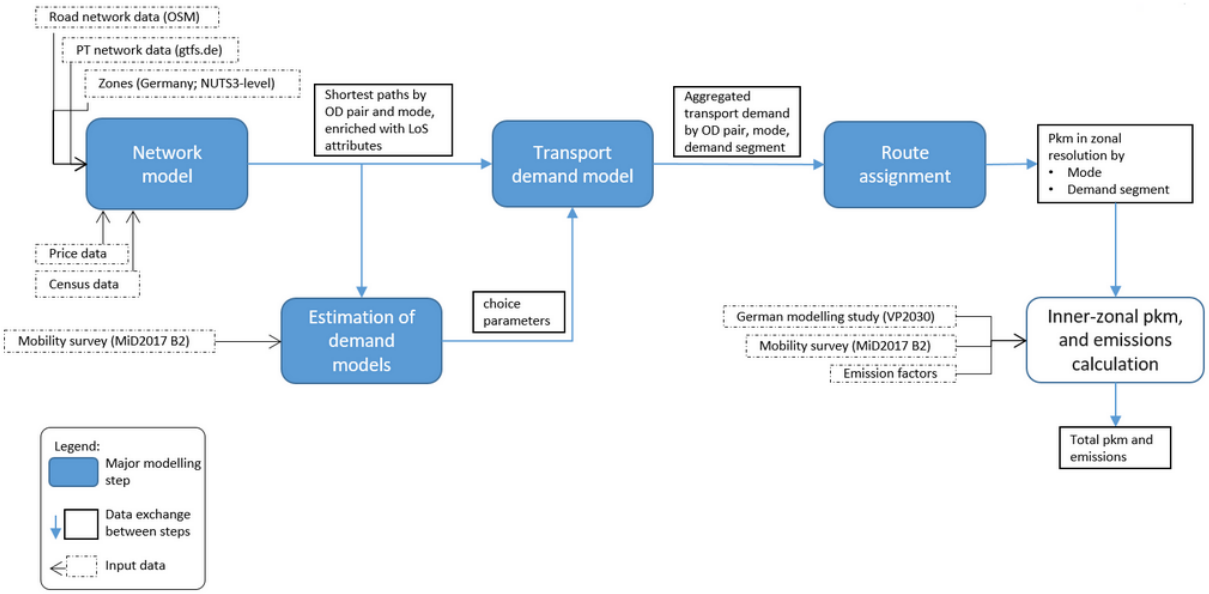

Abbildung 4: Struktur Quetzal_Germany (Arnz 2022)

In dieser Abbildung ist gut zu erkennen welche Daten für welchen Modellierungsschritt benötigt werden. Besonders für die Erstellung des Verkehrsnetzes (network model) werden viele Daten wie z.B. die Fahrpläne des ÖPNVs benötigt. Zusätzlich wird das Modell durch verschiedene Datenerhebungen wie MiD 2017 kalibriert. Das Ergebnis des Modells sind die Personenkilometer (Pkm)

aufgeschlüsselt nach dem Modus und dem Nachfragesegment (demand segment). Die Nachfragesegmente wurden in vorangegangenen Schritten festgelegt und gliedern die Gesellschaft entsprechend der eingegebenen Datensätze. Ein Beispiel ist die Unterscheidung in ‚Autobesitz' und ‚kein Autobesitz'. Fahrten des Segments ‚kein Autobesitz' können in dem Fall nicht auf den MIV verteilt werden.

Für die Funktionsweise des Modells ist die Erstellung des Verkehrsnetzes von besonderer Bedeutung, da hier der größte Anteil der Dateneingabe erfolgt. Abbildung 5 zeigt den Schritt der Netzwerkvorbereitung (network preparation) aufgeteilt in die Hauptbestandteile Zonen (zones), öffentliches Verkehrsnetz (public transport network) und Straßennetz (road network).

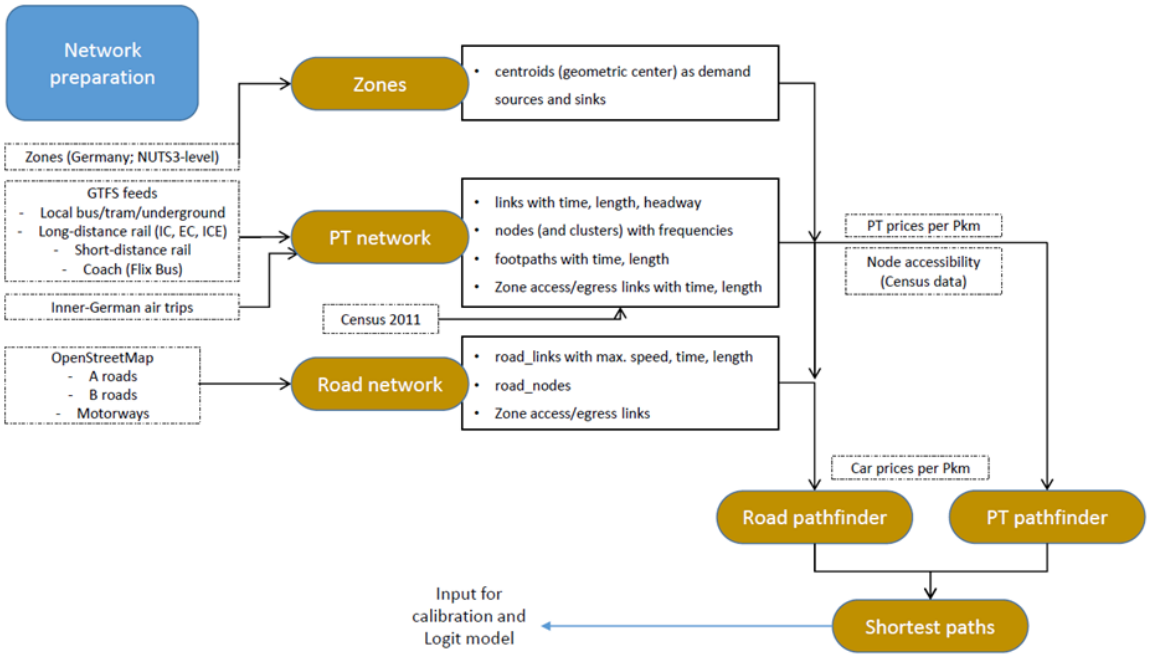

Abbildung 5: Aufschlüsselung der Netzwerkvorbereitung (Arnz 2022)

Wie oben erwähnt wird zunächst das zu analysierende Gebiet in verschiedene Zonen unterteilt. In Quetzal_Germany wurden dafür die Landkreise verwendet, was der NUTS-3-Ebene[5] entspricht. Der geometrische Mittelpunkt wird als Zentrum (centroid) definiert und fungiert als Start- und Zielpunkt der Fahrten. Für das öffentliche Verkehrsnetz wurden frei verfügbare Fahrplandatensätze im GTFS (General Transit Feed Specification) und die innerdeutschen Flugverbindungen verwendet. Die GTFS-Daten enthalten den kompletten Fern- und Regionalverkehr der Deutschen Bahn sowie den Nahverkehr sämtlicher Verbünde und Anbieter in Deutschland (Brosi 2019). Das resultierende Netzwerk beinhaltet die Verbindungen

[5] Nomenclature des Unités territoriales statistiques; geografische Systematik nach der das EU-Gebiet in drei Hierarchiestufen eingeteilt wird; NUTS-3 entspricht in Deutschland den Kreisen und kreisfreien Städten (Statistisches Bundesamt 2022a).

(links) einschließlich der Zeit, Länge, Bewegungsrichtungen und Knotenpunkte (nodes) einschließlich der Frequenzen. Außerdem umfasst es die Fußverbindungen zwischen Haltestellen und die Zugangs-/Ausstiegsverbindungen der Zonen. Für das Straßennetz werden OSM-Daten verwendet, wobei das resultierende Netzwerk ebenfalls aus den Verbindungen, Knotenpunkten und Zugangs-/Ausstiegsverbindungen der Zonen besteht. Für die Ermittlung des kürzesten Weges werden verschiedene Pfadfinder verwendet. Dazu werden die verschiedenen Preise, je nach Fortbewegungsart, hinzugefügt. Die kürzesten Wege dienen als Input für die Kalibrierung und das Logit-Modell.

2.2 Anwendung für Flensburg

Flensburg ist eine Stadt mit 96.920 Einwohnern (2019), die sich auf eine Fläche von 56,73km² in 13 Stadtteilen verteilen (Stadt Flensburg 2020). Zur Erstellung eines Verkehrsmodells für die Stadt wird zunächst die Struktur und Funktionsweise des Modells Quetzal_Germany übernommen. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass ein freies und plausibles Modell entsteht. Das neue Modell soll in verschiedenen Bereichen angepasst werden, sodass es für die Fragestellung geeignet ist. Auf der einen Seite werden Veränderungen innerhalb der Modellstruktur vorgenommen und auf der anderen Seite werden die Input-Daten angeglichen. Außerdem müssen die Systemgrenzen und die Limitierungen des Modells definiert werden.

2.2.1 Modellanpassungen für Quetzal_Flensburg

Das Flensburger Modell hat das Ziel die Auswirkungen von Klimapolitikmaßnahmen für nachhaltige Mobilität darzustellen. Daher wurde das Modell um den nicht-motorisierten Individualverkehr ergänzt, da diese bei der Fortbewegung keine Emissionen erzeugen.

Abbildung 6 zeigt die vorgenommene Erweiterung in dem Schritt der Netzwerkvorbereitung. Grau eingefärbt sind das ergänzte Fußgängernetzwerk (walk network) sowie das Radfahrnetzwerk (bike network). Beide Netzwerke wurden ähnlich wie das Straßennetz erstellt und beziehen die Netzwerkinformationen von OSM. Sie beinhalten die Verbindungen, Knotenpunkte sowie den Zugang/Ausgang zu den Zonen. Da im ursprünglichen Modell keine nicht-motorisierten Modi verfügbar sind, wurde zur Ermittlung der kürzesten Wege an dieser Stelle ebenfalls der Pfadfinder für das Straßennetz verwendet. Auf diese Weise konnte der zusätzliche Programmierungsaufwand vermindert werden. Es besteht ebenfalls die Möglichkeit Kosten pro Kilometer zu hinterlegen. Allerdings werden an dieser Stelle

ausschließlich Verbrauchskosten, die während des Weges entstehen ergänzt, sodass diese für die neuen Modi bei null liegen.

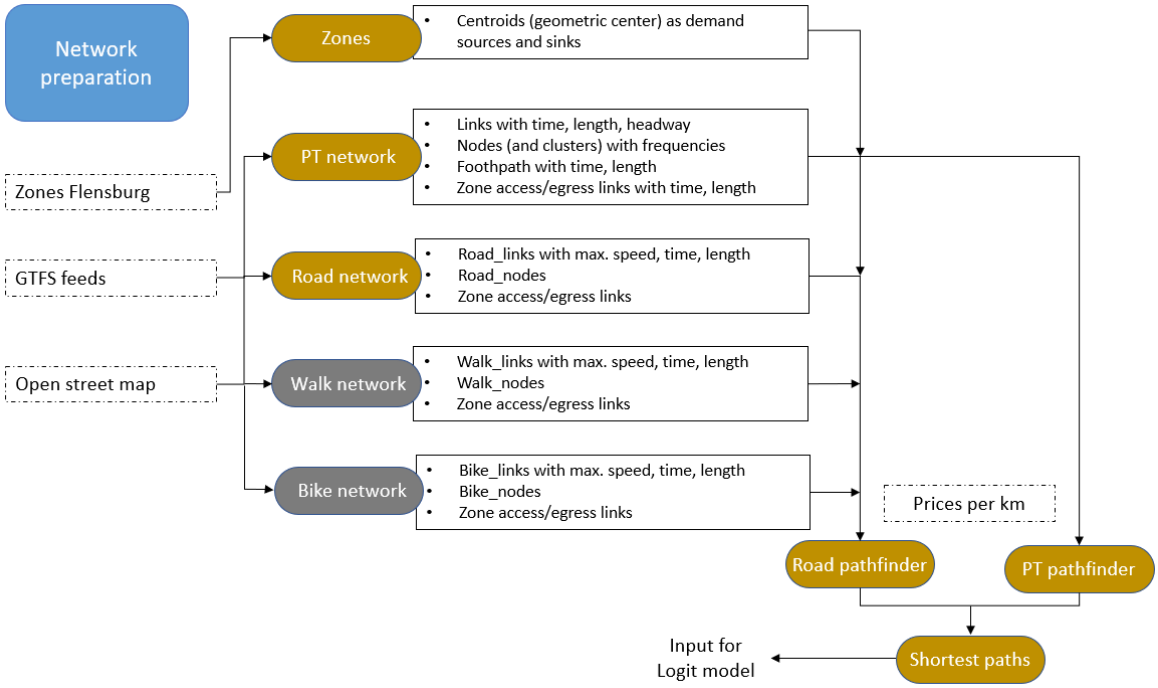

Abbildung 6: Netzwerkvorbereitung Quetzal_Flensburg; eigene Darstellung nach (Arnz 2022)

2.2.2 Dateneingabe

Für das Flensburger Modell ist es essenziell die lokalen Verkehrsdaten einzuarbeiten. Wie in Kapitel 2.1.3 erwähnt, basieren die Verkehrsnetze auf Datensätzen von GTFS bzw. Open Street Map. Dies wird weiterhin beibehalten, wobei das abzubildende Gebiet nicht mehr Deutschland, sondern der Stadt Flensburg entspricht. Für den ersten Modellierungsschritt, die Verkehrserzeugung, muss das Gebiet in Verkehrsanalysezonen aufgeteilt werden. Für die Aufteilung und Erstellung der Zonen wurde sich an den Stadtteilen orientiert, da in dieser Auflösung die meisten Daten verfügbar sind. Die Personen bewegen sich zwischen den Zonen hin und her, weshalb es wichtig ist die Bevölkerung möglichst gleichmäßig auf die Zonen zu verteilen. Daher wurden aus den 13 Stadtteilen elf verschiedene Zonen erstellt, die jeweils einen Bevölkerungsanteil von 7 – 12% beherbergen. Auf diese Weise ergibt sich eine maximale Abweichung von 5% zwischen den einzelnen Zonen. Tabelle 1 listet die verschiedenen Zonen und den entsprechenden Bevölkerungsanteil sowie die Beschäftigungsquote auf. Trotz verschiedener Überlegungen die Bevölkerung möglichst gleichmäßig auf die Zonen zu verteilen, gibt es weiterhin zwei Ausreißer. Zone zwei (Nordstadt) beinhaltet 12,5% der Bevölkerung und Zone elf (Engelsby und Tarup) 13%, diese Werte entsprechen Abweichungen von 0,5% bzw. 1%. Die Beschäftigungsquote ist neben dem Bevölkerungsanteil eine wichtige Information, da hiervon die Arbeitswege abgeleitet

werden. Die Anzahl leitet sich von der Anzahl der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten ab. Anhand der eingegebenen Daten wird ebenfalls die Bevölkerungsdichte und die Beschäftigungsdichte ermittelt.

Tabelle 1: Dateninput für die Zonen

Zone	Stadtteil/e	Bevölkerung	Bevölkerungsanteil [%]	Anzahl der Beschäftigten
0	Altstadt und Neustadt	8.563	8,8	3.042
1	Nordstadt	12.160	12,5	3.834
2	Westliche Höhe	8.034	8,3	2.452
3	Friesischer Berg	6.696	6,9	2.454
4	Weiche	7.435	7,7	2.551
5	Südstadt und Sandberg	10.901	11,2	4.008
6	Jürgensby	8.424	8,7	3.091
7	Fruerlund	6.909	7,1	2.410
8	Mürwik 1	7.607	7,8	2.314
9	Mürwik 2	7.607	7,8	2.314
10	Engelsby und Tarup	12.584	13,0	4.393
Summe		96.920	100	32.862

Die definierten Zonen wurden im nächsten Schritt mit Hilfe der Geoinformationssysteme GeoJSON und QGIS in eine Karte eingezeichnet und mit den eben genannten Daten hinterlegt. Das Quetzal-Modell importiert im Skript die Karte einschließlich der Informationen als Verkehrsanalysezonen. Abbildung 7 zeigt die Stadt Flensburg mit den verschiedenen Zonen. In Rot markiert ist Zone 8 mit den eigens hinterlegten Informationen. Abbildung 8 zeigt das neu hinzugefügte Verkehrsnetz für Fußgänger*innen.

Abbildung 7: Zonen im Flensburger Modell

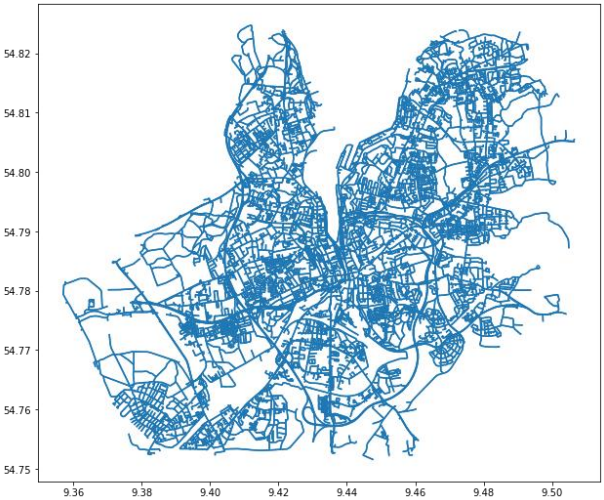

*Abbildung 8: Fußgänger*innen Netzwerk*

An verschiedenen Stellen des Modellcodes werden weitere Daten und Informationen abgefragt. Da im Code Beschränkungen integriert sind, muss z.B. ein bestimmter Zeitraum gewählt werden. In der Mobilität sind besonders zwischen Wochentagen und Wochenendtagen sowie den verschiedenen Tageszeiten Unterschiede zu erkennen. Dies spiegelt sich auch in der allgemeinen Mobilität und den Fahrplänen des öffentlichen Verkehrs wider, wo beispielsweise nachts kaum Busse unterwegs sind. Für das Flensburger Modell wurde daher ein Werktag (Dienstag) zufällig ausgewählt. Tabelle 2 veranschaulicht weitere Daten, die in das neue Modell eingegeben worden sind, sowie die Quelle und gegebenenfalls eine kurze Erklärung. Sie bilden die Grundlage für das Basismodell.

Tabelle 2: Übersicht der Input-Daten für das Basismodell

Parameter	Wert	Quelle und Erklärung
Geschwindigkeit Fußverkehr	5 km/h	Durchschnittsgeschwindigkeiten nach Verkehrsmittel im Binnenverkehr (Stadt Flensburg 2022).
Geschwindigkeit Radverkehr	13 km/h	Durchschnittsgeschwindigkeiten nach Verkehrsmittel im Binnenverkehr (Stadt Flensburg 2022).
Geschwindigkeit öffentlicher Verkehr	20,4 km/h	Im Modell berechnet, indem die Länge der Verbindungen mit der Zeit dividiert wird.
Geschwindigkeit MIV	21 km/h	Durchschnittsgeschwindigkeiten nach Verkehrsmittel im Binnenverkehr

		(Stadt Flensburg 2022).
Streckenpreis Fußverkehr	0 €	Annahme: Die Verwendung des Verkehrsnetzes kostet nichts.
Streckenpreis Fahrradverkehr	0 €	Annahme: Die Verwendung des Verkehrsnetzes kostet nichts.
Streckenpreis öffentlicher Verkehr	1,875 €/ Fahrt	Annahme: Preis für ein Tagesticket dividiert durch die durchschnittlichen Wege pro Tag (Aktiv Bus Flensburg GmbH 2022).
Streckenpreis MIV	13 ct/km	Annahme: rechnerische Kosten pro gefahrenen km (laufende Kosten) bestimmt durch Auto-Rechner (Gottfried EDV 2022).
Beschäftigungsrate	50,4 %	Anzahl der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten im Jahr 2019 (Stadt Flensburg 2020).
Durchschnittliche Anzahl an Wegen/Tag	3,2	Durchschnittliche Anzahl an Wegen pro Einwohner*in pro Tag (Stadt Flensburg 2022).
Anteil PKW-Besitz	75 %	PKW Verfügbarkeit in den Haushalten (Stadt Flensburg 2022).

2.2.3 Kalibrierung

Nach der Dateneingabe soll das Flensburger Modell so kalibriet werden, dass es möglichst exakt den Modal Split (Fahrten) widerspiegelt. Dieser ist in Abbildung 9 dargestellt und zeigt eine Verteilung von 44% MIV, 24% Fahrrad, 24% Fußgänger*innen und 8% ÖPNV. Da innerhalb des ÖPNVs in Flensburg der Bus die einzige Option ist, werden diese Begriffe in diesem Kontext gleichgesetzt.

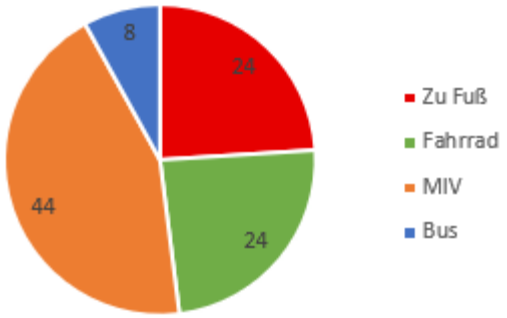

Abbildung 9: Modal Split Flensburg 2021 (Fahrten) [%]; eigene Darstellung nach Stadt Flensburg (2022)

Ziel ist es mit dem Flensburger Modell einen Modal Split zu erreichen bei denen die Anteile maximal ±5% von den tatsächlichen Werten abweichen. Dafür werden Parameter für das Logit-Modell benötigt, welche einen Auswahlbaum der verschiedenen Mobilitätsarten sowie Beta-Parameter der Nutzenfunktion definieren, was im Stufenmodell in Schritt 3, der Verkehrswahl geschieht (Arnz 2022). Die Beta-Parameter bestimmen den relativen Einfluss der betrachteten Attribute auf die Gesamtzufriedenheit bzw. den Gesamtnutzen und sollten aus einer Mobilitätserhebung stammen. Daher wurden die Werte für Beta-Parameter ‚time' (Zeitsensibilität) und ‚price' (Preissensibilität) aus dem Quetzal_Germany Modell übernommen, welche auf den Daten von MiD 2017 beruhen. Außerdem wurden die alternativspezifischen Konstanten (ASC) für den Nutzen der verschiedenen Modi der Mobilität ebenfalls von den Input-Daten des Quetzal_Germany Modells abgeleitet. Die ASC können als Einfluss der Merkmale, die nicht explizit in einem Merkmal oder Individuum inbegriffen sind aufgefasst werden (Ben-Akiva und Bierlaire 1999). Da es im Flensburger Modell, im Gegensatz zu Quetzal_Germany, keine Differenzierung bei den Zwecken der Wege gibt, wird je Nachfragesegment der Mittelwert der ASCs gebildet. Im Anschluss werden zur Kalibrierung des Modellergebnisses die spezifischen Werte für den Nutzwert (utility value) der Beta-Parameter nach Segment durch Ausprobieren geschätzt.

2.2.4 Systemgrenzen

Wie jedes Modell verfügt Quetzal_Flensburg über Systemgrenzen und Limitierungen. Diese geben zum einen Aufschluss darüber, an welchen Stellen die tatsächliche Mobilität nicht abgebildet werden kann und zum anderen, wo im Falle einer Weiterentwicklung angeknüpft werden könnte.

Das neue Modell befasst sich ausschließlich mit dem Flensburger Stadtgebiet und den Wegen innerhalb der Stadt. Dies hat zur Folge, dass Mobilität außerhalb des Stadtgebiets nicht in der Modellierung abgebildet ist. Daher ist der Ein- und Auspendlerverkehr, welcher von den umliegenden Dörfern sowie dem Grenzverkehr zu Dänemark entsteht, nicht integriert. In Flensburg zählt zu den öffentlichen Verkehrsmitteln der Bus, sodass weitere bekannte öffentliche Verkehrsmittel (z.B. U-Bahn) nicht zu Auswahl stehen. Durch das eingeschränkte Gebiet ist auch der Fernverkehr z.B. mit der Bahn oder dem Flugzeug keine auswählbare Option. Weiterhin ist wie in Kapitel 2.2.2 eine zeitliche Restriktion im Code implementiert, welche im Flensburger Modell einem zufällig ausgewählten Werktag entspricht. Für eine weitergehende Analyse bspw. der Wochenendtage, müssten zusätzliche Simulationen durchgeführt werden. Die letzte Limitierung bezieht sich auf die Wegzwecke, welche im Modell simuliert werden. Das Flensburger Modell simuliert

Wegzwecke für den Arbeitsweg und den Einkauf. Eine detailgetreuere Auflösung erfordert weitere Analysen, Programmierung und spezifische Inputdaten.

2.3 Mobilitätsumfrage

Jedes Verkehrsmodell benötigt eine Vielzahl an Daten, um ein möglichst realistisches Abbild der wirklichen Situation wiedergeben zu können. Dies sind nicht nur Verkehrsdaten, sondern auch soziodemographische Daten sowie Erhebungen zu der Motivation der Verkehrsteilnehmer*innen Entscheidungen zu treffen. Für das Flensburger Modell wurde sich hierbei vor allem auf Erhebungen der Stadt selbst sowie der MiD 2017-Studie bezogen. Als zusätzliche Ergänzung wird die Anfang 2022 von der Nachwuchsforschungsgruppe EnSu in Zusammenarbeit mit aproxima Markt- und Sozialforschung Weimar GmbH durchgeführte Mobilitätsumfrage verwendet. In dieser Umfrage wurden Menschen zu ihrem Mobilitätsverhalten und ihren Beweggründen für dieses befragt. Außerdem wurden soziodemografische Daten und Meinungen zu Klimapolitikmaßnahmen für nachhaltige Mobilität aufgenommen. Es wurde deutschlandweit, aber auch ganz spezifisch in Flensburg befragt, sodass die Ergebnisse als zusätzliche Vergleichswerte oder Inputdaten verwendet werden können. Für Flensburg konnte eine Fallzahl von n=500 entgegengenommen werden. Mittels der Umfrageergebnisse wurden im Flensburger Modell die Werte für die Aussendungen und Anziehungskraft jeder Zone aus dem Modellierungsschritt ‚Verkehrserzeugung' berechnet. Die Umfrageteilnehmer*innen gaben ihre Wege an, inklusive Start- und Zielzone sowie den Mobilitätszweck. Der entsprechende Auszug des Umfragebogens ist in Anhang A zu finden. Zu den möglichen Mobilitätszwecken gehören Arbeit, dienstliche Wege, Ausbildung, Einkauf, Erledigungen, Freizeit und Begleitung. Die Anzahl in einer Zone befindlichen Startpunkte wurden als Aussendung und die Anzahl in einer Zone befindlichen Ziele als Anziehungskraft interpretiert. Da die Umfrageergebnisse nicht die gesamte Bevölkerung von Flensburg umfasst, wurden die Anzahlen entsprechend auf skaliert, d.h. in diesem Fall mit dem Faktor 193,84 multipliziert.

2.4 Szenario 0: Basisfall Flensburg

Der Basisfall Flensburg bildet die Ausgangslage für die Szenarien. Er beinhaltet die vorgenommenen Modellerweiterungen, Dateneingabe für Flensburg sowie die Kalibrierung, um ein möglichst exaktes Abbild des Modal Splits der Stadt zu erhalten. Wie im Kapitel 2.2.3 erwähnt, wurde anhand des Modal Split nach Fahrten der Stadt Flensburg kalibriert. Abbildung 10 zeigt den Modal Split der Stadt aus dem Jahr 2021 und dem des Flensburger Modells im Vergleich.

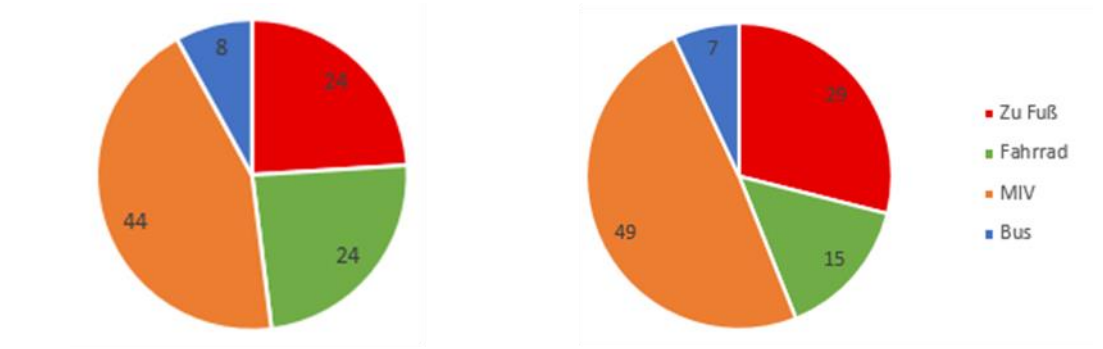

Abbildung 10: Vergleich Modal Split (Fahrten) Stadt Flensburg (links) und Flensburger Modell (rechts) [%]

Im Flensburger Modell wird bei den meisten Verkehrsmodi die angestrebte Abweichung von maximal ±5% des eigentlichen Wertes eingehalten. Ausnahme hierfür bildet der Modus ‚Fahrrad', welcher im Modell eine Abweichung von 9% verzeichnet. Auf eine genauere Anpassung wurde aus Gründen der Konsistenz verzichtet, da hierfür auch eine zufällige Veränderung der Input-Daten aus den MiD-Datensatz notwendig gewesen wäre. Dadurch überwiegt der Anteil an Fußgänger*innen dem Anteil der Fahrradfahrer*innen, was bei der Ergebnisanalyse beachtet werden muss. Die geringste Abweichung ist beim Modus ÖPNV bzw. Bus, welche 1% beträgt.

Im Flensburger Modell wird ebenfalls der Modal Split bezogen auf Personenkilometer (Pkm) bzw. Verkehrsleistung berechnet. Hier nimmt besonders der Anteil des MIV am Modal Split unverkennbar zu. Abbildung 11 zeigt den Modal Split (Pkm) der Stadt Flensburg aus dem Jahr 2021 und den des erstellten Modells im Vergleich.

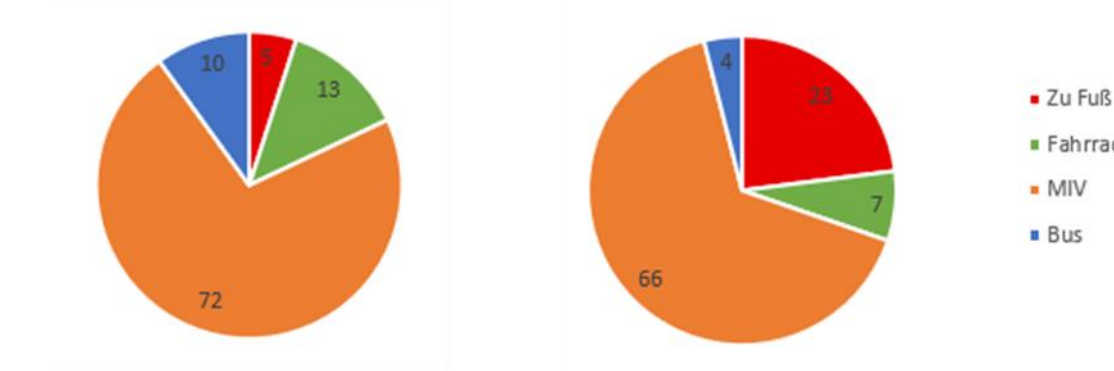

Abbildung 11: Vergleich Modal Split (Pkm) Stadt Flensburg (links) und Flensburger Modell (rechts) [%]

Die Abweichungen beim Modal Split nach Personenkilometern beträgt in den Modi ‚Fahrrad', ‚MIV', und ‚Bus' ±6%, wohingegen die Abweichung beim Modus ‚zu Fuß' 18% beträgt. Ein möglicher Grund für die Abweichungen könnten die festgelegten Systemgrenzensein. Das Flensburger Modell betrachtet ausschließlich das Stadtgebiet selbst, sodass Distanzen von höherer Entfernung oder außehalb des

Gebiets in den Wegen nicht berücksichtigt sind. Der Modal Split der Stadt Flensburg bezieht sich hierbei auf Wege welche bis zu 100km lang sind.

Insgesamt kommt das erstellte Modell der Verkehrssituation in der Stadt Flensburg äußerst nah. Die Einschränkung der Mobilität auf das Stadtgebiet hat zur Folge, dass im Modell keine Fahrten von hoher Distanz durchgeführt werden. Dies wird besonders anschaulich im Modal Split nach Personenkilometern. Der Modus ‚zu Fuß' ist bei der Analyse innerhalb der städtischen Grenzen durchaus attraktiv. Bei der Ergebnisanalyse ist diese Auffälligkeit zu berücksichtigen.

Innerhalb des Modells werden Personen nach Autobesitz unterschieden und in unterschiedlichen Nachfragesegmenten betrachtet. Aus diesem Grund sind weitere verfügbare Ergebnisse des Modells der Modal Split nach Fahrten und nach Personenkilometer für das Segment ‚kein Auto'. Abbildung 12 zeigt den Modal Split dieses Nachfragesegments nach Fahrten und nach Personenkilometern.

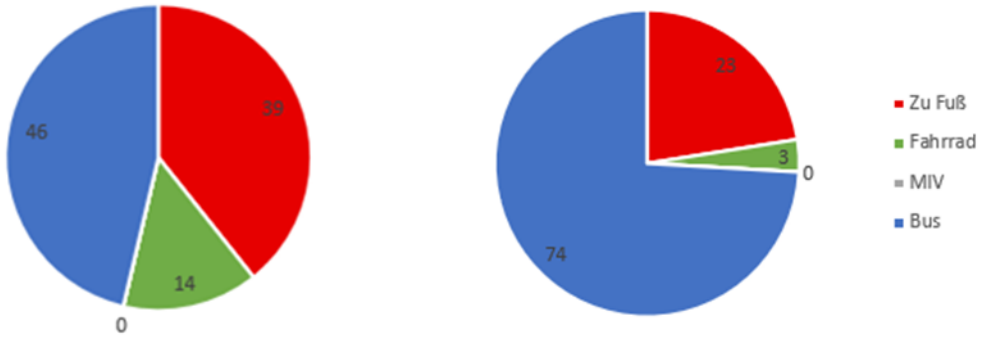

Abbildung 12: Modell Modal Split Fahrten (links) und Modal Split Pkm (rechts) im Segment ‚kein Auto' [%]

In der Gruppe, in der kein Auto zur Verfügung steht, werden die Fahrten durch die anderen Modi abgedeckt. Ein Großteil der Fahrten wird vor allem durch den Bus abgedeckt. Auf diese Weise werden bei dem Modal Split nach Personenkilometer fast drei Viertel der Strecke durch den Bus zurückgelegt. Auch hier ist die erhöhte Bedeutung des Fußverkehrs erkennbar.

3 Szenarien

Mit Hilfe des Flensburger Verkehrsmodells sollen nun die Auswirkungen verschiedener Klimapolitikmaßnahmen für den Weg zur nachhaltigen Mobilität analysiert werden. Die Auswahl der Maßnahmen orientiert sich an bekannten Maßnahmen, die teilweise ebenfalls im „Masterplan Mobilität 2030“ der Stadt Flensburg enthalten sind. Dabei können die Maßnahmen grundsätzlich in stetig und konstant unterteilt werden. Zu den stetigen Maßnahmen gehören solche, die z.B. zu einer Veränderung der Geschwindigkeit oder des Preises führen. In diesem Fall werden zur Veranschaulichung die Parameter in 10%-Schritten minimiert bzw. maximiert. Auf diese Weise kann die Wirksamkeit der Maßnahme spezifiziert und die Vergleichbarkeit zu anderen Szenarien gewährleistet werden. Die entstehenden Szenarien geben den neuen Modal Split nach Fahrten bzw. Personenkilometern wieder. Tabelle 3 ist eine Übersicht der durchgeführten Szenarien. Insgesamt werden sechs verschiedene Situationen durch das Flensburger Modell simuliert, wobei Nr. 0 der Ausgangssituation und Nr. 5 eine Kombination der verschiedenen Szenarien darstellt. Die Szenarien werden in den Kapiteln 3.1 bis 3.5 genauer erläutert.

Tabelle 3: Übersicht der Szenarien

Nr.	Szenario Bezeichnung	Kurze Erläuterung	Modellumsetzung	beeinflusste Parameter
0	Basisfall	Beschreibung der Ausgangssituation	Bestmögliche Abbildung der aktuellen Situation	/
1	9€-Ticket	Implementierung des bundesweiten 9€-Tickets	Hinzufügen eines neuen Nachfragesegments	ticket_rate
2	Umweltverbund	Förderung von ÖPNV und Radverkehr	Änderung der Kosten und Fahrgeschwindigkeit	cycling_speed, ticket_price
3	Autovermeidung	Verminderung der Autonutzung	Änderung der Kosten für PKW	price
4	Autofrei	Schaffung von autofreien Räumen	Änderung des Straßennetzes	keine
5	Kombination	Gemeinsamer Einfluss der Szenarien 1-4	Modellumsetzung von Nr. 1-4	ticket_rate, cycling_speed, ticket_price, price

3.1 Szenario 1: 9€-Ticket

Das erste Szenario soll die Auswirkungen des zwischen Juni und September 2022 zeitweise eingeführten 9€-Tickets für den Stadtverkehr zeigen. Dies bedeutet, dass die Bürger*innen in jedem der drei Monate die Möglichkeit haben ein ÖPNV-Ticket für 9€ zu erwerben, welches bundesweit im Nahverkehr gültig ist. Ticketbesitzer*innen können eine beliebige Anzahl an Fahrten durchführen.

Innerhalb es Flensburger Modells wurde dafür zwei zusätzliche Nachfragesegmente hinzugefügt. Ähnlich wie zum Autobesitz wird dadurch in der Fahrtenverteilung unterschieden in ‚Ticketbesitzer*in' (ticket_owner) und ‚kein/e Ticketbesitzer*in' (no_ticket). Aufgrund der Aktualität des Tickets, gibt es bisher keine Analyse zur tatsächlichen Nutzung des Tickets. Daher wurde in dem Modell der Parameter ‚ticket_rate' hinzugefügt, welcher den prozentualen Anteil der Ticketbesitzer*innen wiedergibt. Für das Szenario 1 wird dieser Parameter auf 43% gesetzt, was aus Umfrageergebnissen zum voraussichtlichen Kauf des realen Tickets für den Monat August 2022 entnommen wurde (Statista GmbH 2022). In diesem Szenario handelt es sich um ein konstantes Szenario, da das 9€-Ticket entweder besessen werden kann oder nicht. Aus diesem Grund gibt es nur eine Simulation. Weiterhin ist anzumerken, dass es aufgrund mangelnder Daten keine Anpassung der Kalibrierungsparameter gibt und die Werte für die Nutzwerte daher den Beta-Parametern der Nutzenfunktion entsprechen. Dies ist bei der Ergebnisanalyse zu beachten.

3.2 Szenario 2: Umweltverbund

In Szenario 2 werden Maßnahmen ergriffen, welche zu Ausbau und Förderung des Umweltverbundes, d.h. des ÖPNV, Rad- und Fußverkehrs beitragen. Die dafür notwendigen Maßnahmen sind überwiegend Pull-Maßnahmen und sollen somit die Nutzung dieser Verkehrsmodi anregen. Besonders die Förderung von Rad- und Fußverkehr ist eine einfache Möglichkeit emissionsneutrale Mobilität umzusetzen.

Maßnahmen zur Verbesserung des ÖPNVs sind Maßnahmen zur Erhöhung der Taktfrequenz, Steigerung der Verlässlichkeit zu allen Tageszeiten (besonders zu Randzeiten), Einführung von Busspuren, Vergrößerung des Liniennetzes sowie Preisvergünstigungen bis hin zum kostenfreien ÖPNV. Langfristig gehört ebenfalls eine Elektrifizierung der Busflotte hinzu, um dem Ziel der Klimaneutralität zu entsprechen. Der ‚Masterplan Mobilität 2030' der Stadt Flensburg beinhaltet ebenfalls die genannten Maßnahmen in angepasster Form. In den 14 Maßnahmen für den Busverkehr sind zusätzlich noch Prüfung spürgeführter Systeme, Schaffung

von Barrierefreiheit und Marketing bzw. der Einsatz von digitalen Medien verankert (Stadt Flensburg 2018). Innerhalb des Modells wird für die Implementierung der Maßnahmen ausschließlich der Ticketpreis (ticket_price) verändert. Eine Veränderung oder Anpassung des Liniennetzes ist sehr aufwändig und übersteigt den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit. Die vom Liniennetz abhängige Busgeschwindigkeit wird daher ebenfalls nicht verändert.

Maßnahmen, welche die Radinfrastruktur verbessern sind unter anderem Verbesserung der Wegebeschaffenheit, Radschnellwege, Implementierung einer ‚Grünen Welle', baulich getrennte Fahrstreifen, sichere sowie wettergeschützte Abstellanlagen und die Aufnahme von Elektrorädern in die Kaufprämie Elektromobilität. Diese und andere Maßnahmen, wie z.B. das Installieren einer Fahrradzählstation, sind ebenfalls im Maßnahmenkatalog der Stadt Flensburg spezifiziert (Stadt Flensburg 2018). Die Maßnahmen für den Radverkehr sorgen vor allem dafür, dass Fahrrad fahren sicherer und schneller wird. Aus diesem Grund wurden diese Maßnahmen mit einer Anpassung des Parameters Radgeschwindigkeit (cycling_speed) dargestellt.

Für eine gute Fußgänger*inneninfrastruktur sind Maßnahmen zur Verbesserung der Wegebeschaffenheit, Straßenübergänge und Sicherheit von Bedeutung. Die Stadt Flensburg will daher z.B. Grünzeiten in jeder Knotenpunktsignalisierung integrieren oder bauliche Verbesserungen und Neuverteilung von Flächen vornehmen (Stadt Flensburg 2018). Die Maßnahmen steigern zwar die Qualität der Wege, dennoch wurden diese für das Verkehrsmodell nicht berücksichtigt. Der Grund hierfür ist, dass der Parameter Gehgeschwindigkeit (walk_speed) im Modell relevant für den Fußverkehr ist, in der Realität jedoch keine beachtliche Veränderung der Gehgeschwindigkeit durch die Maßnahmen erwartet wird. Dennoch sind die Effekte der Maßnahmen bei der qualitativen Betrachtung mit einzubeziehen.

Insgesamt werden demnach zwei Parameter (ticket_price und cycling_speed) stetig verändert, um die Auswirkungen der Maßnahmen festzustellen. Die Wirksamkeit der Einzelmaßnahmen soll dabei erkenntlich bleiben, weshalb beim Modellieren zunächst einzeln die Radgeschwindigkeit um jeweils 10% erhöht (Szenario 2A) und in einem weiteren Durchlauf der Ticketpreis um jeweils 10% verringert (Szenario 2B) wird. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht mit den im Modell eingesetzten Werten für die Parameter Radgeschwindigkeit (cycling_speed) und Ticketpreis für den ÖPNV (ticket_price). Zuletzt werden in einer weiteren Simulation Radgeschwindigkeit und Ticketpreis gleichzeitig verändert, was im Szenario 2Mix festgehalten ist und damit die Förderung des Umweltverbundes verkörpert.

Tabelle 4: Übersicht der eingesetzten Parameter Szenario 2

Maximierung/ Minimierung	0	±10%	±20%	±30%	±40%	±50	±60%	±70%	±80%	±90%	±100%
cycling_speed* [m/s]	3,6	4,0	4,3	4,7	5,1	5,4	5,8	6,1	6,5	6,9	7,2
ticket_price* [€/Weg]	1,9	1,7	1,5	1,3	1,1	0,9	0,8	0,6	0,4	0,2	0,0

**gerundete Werte; eine Übersicht der ungerundeten Werte befindet sich in Anhang B.1*

3.3 Szenario 3: Autovermeidung

Szenario 3 behandelt Push-Maßnahmen, welche die Autonutzung vermeiden sollen. Zu solchen Klimapolitikmaßnahmen gehören unter anderem eine fahrleistungsabhängige Maut, Einführung eines Tempolimits, Erhöhung der CO_2-Bepreisung oder die Neuverteilung des Straßenraums zu Gunsten des Umweltverbundes. In der Stadt Flensburg stehen vor allem Maßnahmen zur Änderung des Parkkonzeptes und -leitsystems sowie die Entwicklung eines Geschwindigkeitskonzeptes im Fokus (Stadt Flensburg 2018). Zudem gibt es Maßnahmen, die den Ausbau an Elektromobilität fördern, was jedoch nicht zu einer Vermeidung der Autonutzung führt.

In diesem Szenario wird daher in dem Modell der Parameter für die Kosten (price) der Autonutzung verändert. Ähnlich wie bei dem Szenario Umweltverbund werden diese Kosten in 10%-Schritten erhöht, sodass sich in der letzten Simulation der Preis pro gefahrenem Kilometer verdoppelt (vgl.Tabelle 5).

Tabelle 5: Übersicht der eingesetzten Parameter Szenario 3

Maximierung	0	±10%	±20%	±30%	±40%	±50	±60%	±70%	±80%	±90%	±100%
price* [ct/km]	13	14	16	17	18	20	21	22	23	25	26

**gerundete Werte; eine Übersicht der ungerundeten Werte befindet sich in Anhang B.2*

3.4 Szenario 4: Autofrei

Szenario 4 ist eine Ergänzung von Szenario 3. In diesem Szenario sollen die Auswirkungen von Maßnahmen zu autofreien Zonen analysiert werden. Dabei gibt es drei verschiedene Maßnahmen, die genauer betrachtet werden. Simulation A zeigt die Auswirkungen der Verkehrsberuhigung vereinzelter Straßen im Innenstadt-

bereich, in Simulation B ist der komplette Innenstadtbereich – im Modell Zone 1 – für das Auto gesperrt und in Simulation C wird die Maßnahme eines autofreien Tages analysiert. Ein solcher Tag könnte in der Realität z.B. an Sonntagen stattfinden. Während es bei der Umsetzung solcher Maßnahmen Ausnahmen geben muss, z.B. für Rettungsdienst, Feuerwehr, Polizei sowie, meist zu festgelegten Zeiträumen, Lieferant*innen und Anwohner*innen, wird in der Simulation von einer solchen Unterteilung abgesehen. Für die Simulation A, bei der vereinzelte Straßen für die Durchfahrt mit dem Auto gesperrt werden, wurde sich am Maßnahmenkatalog der Stadt Flensburg orientiert, welche eine Verkehrsberuhigung in der Norderstraße und eine Veränderung in der Verkehrsführung in der Rathausstraße/ZOB vorsieht (Stadt Flensburg 2018). Daher werden für die Simulation A die Norderstraße und die Rathausstraße aus dem Straßennetz für den Modus ‚Auto' entfernt, sodass diese nicht nutzbar sind. Für die Simulation B wird dies erweitert auf die komplette Zone 1, sodass das Straßennetz für den Modus ‚Auto' aus einer Zone weniger besteht. Abbildung 13 veranschaulicht die unterschiedlichen Straßennetze, wobei besonders in Simulation B ein Unterschied zum ursprünglichen Verkehrsnetz erkennbar ist. In Simulation C wird innerhalb des Modells der Nutzen (utility) für die Autonutzung so angepasst, dass dieser Modus nicht mehr verwendet wird.

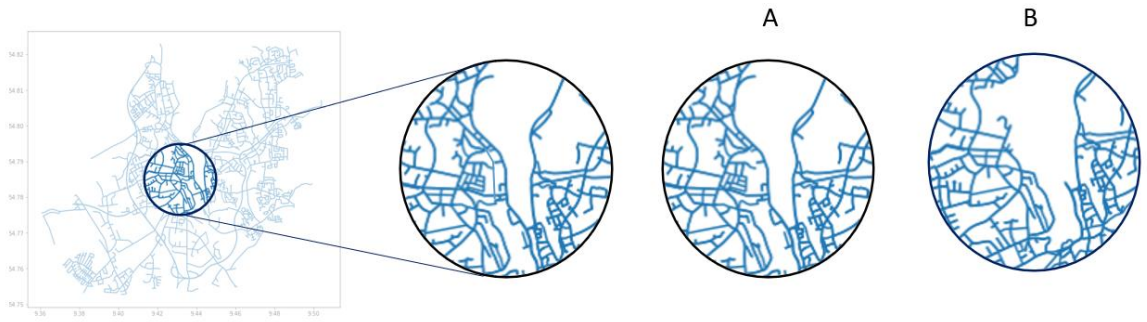

Abbildung 13: Ursprüngliches Straßennetz im Vergleich mit dem Straßennetz aus den Simulationen 4.A und 4.B

3.5 Szenario 5: Kombination der Szenarien

In den vorangegangenen Szenarien wurde die Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen genauer betrachtet. In Szenario 5 werden diese Szenarien vereint, sodass die gesamte Menge an Maßnahmen analysiert werden kann. Wie bei den stetigen Szenarien wird es auch in Szenario 5 verschiedene Simulationen geben, welche in Tabelle 6 veranschaulicht werden. Die grün eingefärbten Zellen geben an bei welcher Simulation die unveränderbaren Szenarien (Szenarien 1 & 4) integriert sind. Bei Szenarien mit sich verändernden Parametern (Szenarien 2 & 3) wurde anstelle einer grünen Einfärbung der entsprechende Parameterwert in die Zelle eingefügt. Das Szenario ‚Autofrei' wird so integriert, dass die Verkehrsberuhigung

der Norderstraße und der Rathausstraße (Szenario 4.A) gleichgesetzt ist mit einer Minimierung bzw. Maximierung der Parameter „cycling_speed“, „ticket_price“ und „price“ von 10% - 30%. Das Szenario 4.B entspricht einer Änderung von 40% - 70% und der autofreie Tag 80% - 100%.

Tabelle 6: Übersicht der Simulationsdurchgänge von Szenario 5

Nr.	Maximierung/ Minimierung	0	±10%	±20%	±30%	±40%	±50%	±60%	±70%	±80%	±90%	±100%
1	9€-Ticket											
2	cycling_speed* [m/s]	3,6	4,0	4,3	4,7	5,1	5,4	5,8	6,1	6,5	6,9	7,2
	ticket_price* [€/Weg]	1,9	1,7	1,5	1,3	1,1	0,9	0,8	0,6	0,4	0,2	0,0
3	price* [ct/km]	13	14	16	17	18	20	21	22	23	25	26
4	A: Straßen											
	B: Zone											
	C: Stadt											

**gerundete Werte; eine Übersicht der ungerundeten Werte befindet sich in Anhang B*

Die Maßnahme des autofreien Tags führt dazu das kein PKW mehr verwendet wird. Um dennoch herauszufinden, ob die Maßnahmen ausreichend sind die Autonutzung auf ein Minimum zu reduzieren, ohne die Verwendung grundsätzlich zu verbieten, werden die letzten drei Simulationen wiederholt und zusätzlich mit der autofreien Innenstadt durchgeführt. In Tabelle 6 ist dies durch die grünen Diagonalen in Szenario 4.B dargestellt.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien vorgestellt. Die Szenarien beinhalten nicht die Entwicklung über Jahre, sondern zeigen die Auswirkungen verschieden stark implementierter Klimapolitikmaßnahmen zur Förderung einer nachhaltigen Mobilität. Anhand der Auswirkungen kann die Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen, aber auch das Zusammenspiel dieser festgestellt werden. Im Anschluss an die Ergebnisse werden qualitativ die einhergehenden Veränderungen beschrieben.

4.1 Szenario 1: 9€-Ticket

Im ersten Szenario wurde das 9€-Ticket implementiert. Dies wurde innerhalb des Modells durch Hinzufügen eines neuen Nachfragesegments durchgeführt. Dadurch wird innerhalb der Ergebnisse nicht nur zwischen ‚Autobesitz' und ‚kein Autobesitz', sondern auch in ‚Ticketbesitz' und ‚kein Ticketbesitz' unterschieden. Die bisherigen Input-Daten haben sich nicht verändert, weshalb der Modal Split für (kein) Autobesitz unverändert bleibt. Dafür liefert das Modell Ergebnisse zur Mobilitätswahl von Personen mit bzw. ohne 9€-Ticket nach Fahrten bzw. Personenkilometer. Abbildung 14 zeigt zunächst den Modal Split der Ticketbesitzer*innen nach Fahrten und Personenkilometern.

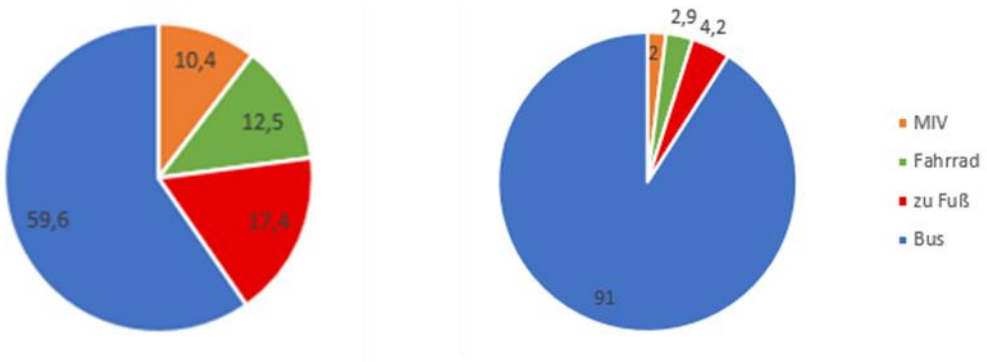

*Abbildung 14: Modal Split Ticketbesitzer*innen nach Fahrten (links) und Pkm (rechts) [%]*

Es wird deutlich, dass der größte Anteil an Fahrten bei Ticketbesitzer*innen mit ca. 60% mit dem Bus durchgeführt wird. Daraufhin folgt der Modus ‚zu Fuß' mit 17,4%, ‚Fahrrad' mit 12,5% und 10,4% der Fahrten erfolgen durch den MIV. Der Anstieg innerhalb des Anteils für den Bus spiegelt sich auch in den Personenkilometern wider. Mit 91% wird fast der gesamte Streckenanteil mit dem Bus zurückgelegt, wohingegen die alternativen Möglichkeiten zwischen 2% und 5% liegen. Im Vergleich dazu ist der Anteil des Busses mit 1,8% bei dem Segment ohne Ticket deutlich

geringer (vgl. Abbildung 15). Die übrigen Wege teilen sich auf in 35,2% zu Fuß, 36,7% mit dem Fahrrad und 26,4% MIV. Abbildung 15 zeigt ebenfalls den Modal Split für den Fall ‚kein Ticket' in Personenkilometern. Fast 50% der Strecken werden mit dem Fahrrad zurückgelegt. Etwa 30% der Strecken werden zu Fuß durchgeführt und weitere ca. 23% mit dem Auto. Nur 0,3% der Strecken passieren durch den Bus. An dieser Stelle wird die fehlende Kalibrierung besonders deutlich. Die Tatsache kein 9€-Ticket zu besitzen führt höchstwahrscheinlich nicht zu einer Förderung des nicht-motorisierten Verkehrs. Daher ist dieses Ergebnis als unzulässig einzustufen.

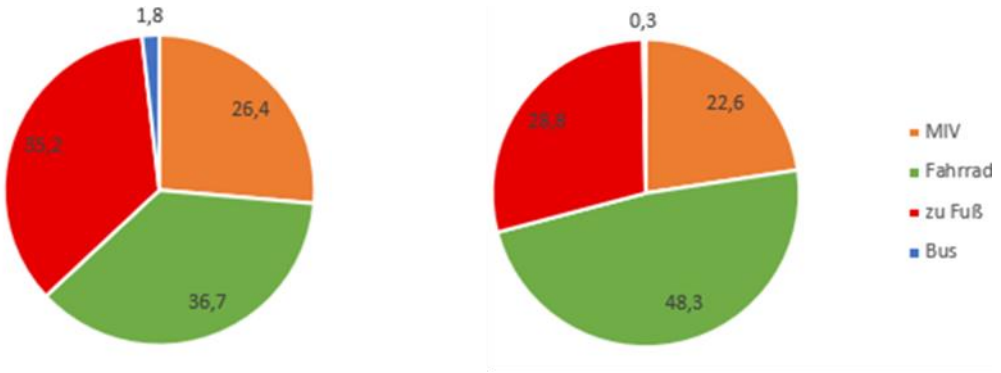

Abbildung 15: Modal Split ohne Ticket nach Fahrten (links) und Pkm (rechts) [%]

4.2 Szenario 2: Umweltverbund

Das Szenario Umweltverbund beinhaltet zwei verschiedene Maßnahmen, die zunächst einzeln und danach gemeinsam betrachtet wurden. Die Maßnahmen zur Förderung des Fahrradverkehrs führen im erstellten Modell zu einer Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit und die Maßnahmen zur Förderung des ÖPNVs zu einer Reduzierung des Fahrpreises.

4.2.1 Verbesserung der Fahrradinfrastruktur

Vergleicht man zunächst den Modal Split der Autobesitzer*innen nach Fahrten der Ausgangssituation mit dem gleichen Modal Split nach einer Verdoppelung der durchschnittlichen Fahrradgeschwindigkeit, lässt sich lediglich eine geringe Veränderung feststellen. Wie in Abbildung 16 festzustellen ist, steigt der Anteil an Fahrten mit dem Fahrrad um 0,8%. Gleichzeitig reduzieren sich die Fahrten mit dem Auto um 0,4%, die zu Fuß zurückgelegten Strecken um 0,2% und die des ÖPNVs um 0,1%. Bei der Personengruppe ohne Auto führt die Steigerung der Geschwindigkeit zu einer geringen Verlagerung von 0,4% vom Modus ‚zu Fuß' zum Modus ‚Fahrrad' (vgl. Anhang C.2).

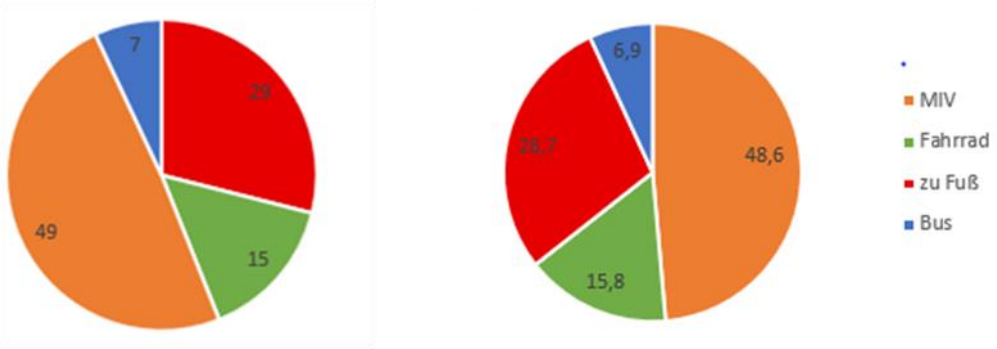

Abbildung 16: Vergleich Modal Split Fahrten Basismodell (links) und Umweltverbund 2.A +100% (rechts) im Segment ‚Auto' [%]

Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse des Basisfalls in Personenkilometern im Vergleich zum Fall mit verbesserter Fahrradinfrastruktur. Es ist ebenfalls ein leichter Anstieg von 1,1% bei der mit dem Fahrrad zurückgelegten Strecke zu erkennen, welcher vor allem zu einer Minimierung der durch den MIV zurückgelegten Strecke führt. Bei den Strecken ohne Auto verringert sich durch die Maßnahme der zu Fuß bewältigte Anteil zu Gunsten des Fahrrads und des ÖPNVs.

Tabelle 7: Vergleich Modal Split Basismodell und Umweltverbund 2.A nach Steigerung der Fahrradgeschwindigkeit um +100% (Pkm) [%]

[%]	Basisfall		Maximierung der Fahrradgeschwindigkeit	
	Mit Auto	Ohne Auto	Mit Auto	Ohne Auto
MIV	65,8	0,0	65,1	0,0
Fahrrad	7,3	3,4	8,4	3,7
zu Fuß	23,0	22,5	22,7	22,1
Bus	4,0	74,1	3,9	74,3

Insgesamt wird deutlich, dass der Ausbau der Fahrradinfrastruktur lediglich eine geringe Auswirkung auf die Mobilitätswahl hat. Das Fahrrad wird zwar etwas häufiger und für einen etwas höheren Streckenanteil verwendet, jedoch kommt dieser Zugewinn nicht ausschließlich von Nutzern emissionsreicher Verkehrsarten.

4.2.2 Verbesserung der Businfrastruktur

In einer weiteren Simulationsreihe wird der Einfluss durch die Maßnahmen der Verbesserung der Businfrastruktur verdeutlicht. Durch die Maßnahmen kann im Vergleich zur Verbesserung der Fahrradinfrastruktur ein höherer Effekt in Bezug auf die Autonutzung erzielt werden. Wie in den Abbildung 17 deutlich wird steigt in der

Gruppe der Autobesitzer*innen der Anteil an Fahrten im ÖPNV von 7% auf ca. 25% an. Gleichzeitig reduziert sich der Anteil an Fahrten durch den MIV um ca. 16% und der durch Fahrräder um ca. 5%. Der Anteil an Wegen durch Fußgänger*innen erhöht sich um 3,2%.

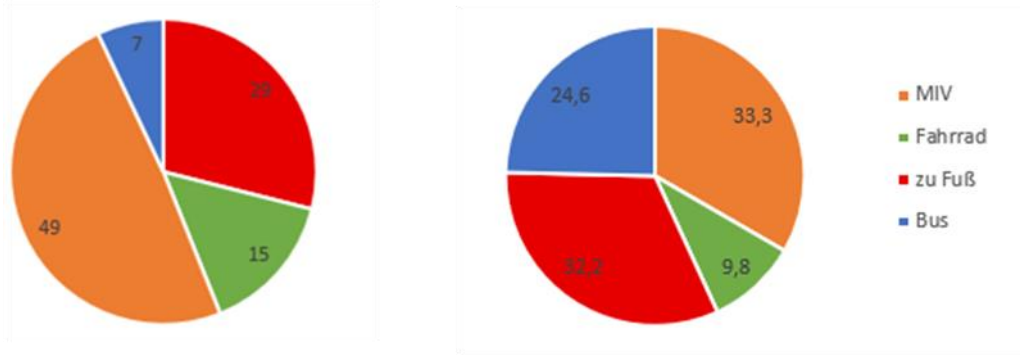

Abbildung 17: Vergleich Modal Split Fahrten Basismodell (links) und Umweltverbund 2.B -100% (rechts) im Segment ‚Auto' [%]

Betrachtet man zusätzlich den Verlauf der Implementierung in Abbildung 18 erkennt man, dass die lineare Reduzierung des Ticketpreises für den Bus zu einer linearen Erhöhung des Busanteils am Modal Split führt. Gleichzeitig reduzieren sich die Anteile des MIV und der Fahrräder, wobei letzter lediglich im geringen Maß sinkt. Auffällig ist die Preisminderung um 70%. Von dieser Stelle an verstärkt sich die Reduzierung des MIV-Anteils von durchschnittlich -1,3% bei der Preissenkung von 10% - 70% auf durchschnittlich -2,2% bei der Preissenkung von 80% - 100%.

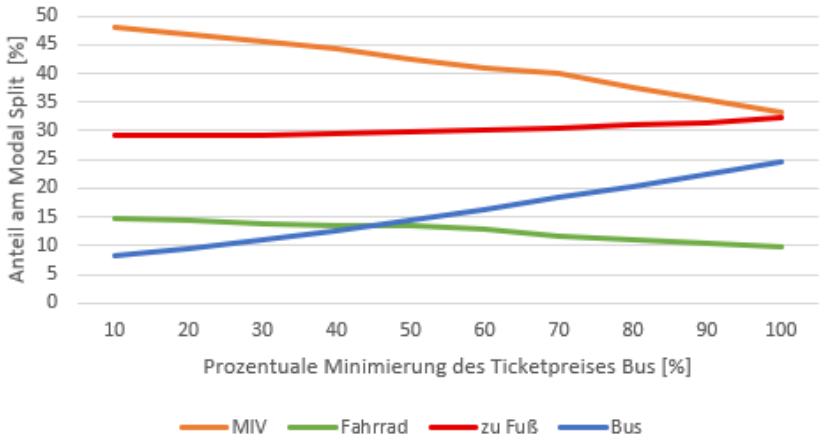

Abbildung 18: Anteil der Verkehrsmodi am Modal Split Fahrten nach Änderung des ÖPNV Preises [%]

Durch die Förderung der Busse ändern sich auch die Anteile der Verkehrsmittel im Modal Split nach Personenkilometern. Wie in Abbildung 19 zu erkennen ist steigt der Anteil des ÖPNVs am Modal Split deutlich. Bei einem kostenlosen ÖPNV-Angebot werden 45% aller zurückgelegten Wegstrecken mit diesem zurückgelegt, was ca. dem 11,5-fachen des anfänglichen Anteils entspricht. Überwiegend ersetzt der

ÖPNV-Anteil die durch den MIV zurückgelegten Strecken, wobei es eine geringe Abnahme beim Anteil an mit dem Fahrrad zurückgelegten Strecken gibt.

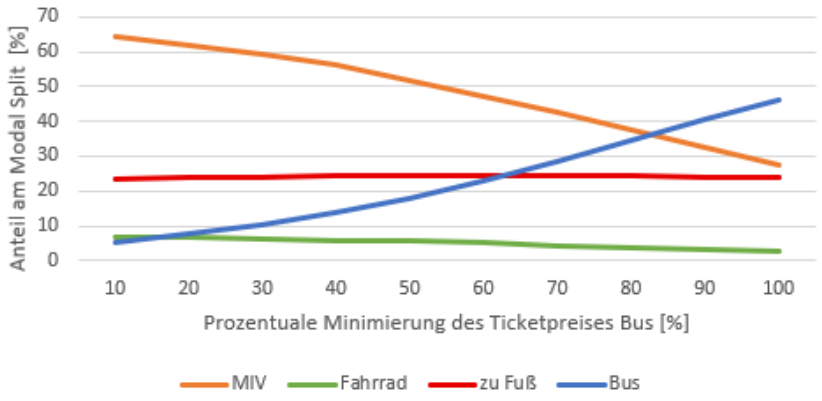

Abbildung 19: Anteil der Verkehrsmittel am Modal Split Pkm nach Änderung des ÖPNV Preises [%]

In dem Nachfragesegment ohne Auto gibt es durch die Verbesserung der Businfrastruktur kaum eine Veränderung. Da hier kein Auto verwendet wird, ist bereits im Basisfall der größte Anteil am Modal Split sowohl nach Fahrten als auch Personenkilometer durch den Bus abgedeckt. Der Anteil des Busses im Modal Split nach z.B. Fahrten, steigert sich durch die Einführung eines kostenlosen ÖPNVs um lediglich 1,8%, was vor allem mit einer Reduzierung des Anteils an Fahrradfahrer*innen einhergeht (Daten vgl. Anhang C.2).

Insgesamt führt die Verbesserung der Businfrastruktur zu einer vermehrten Nutzung des ÖPNVs. In einem Gebiet wie der Stadt Flensburg ändert sich vor allem der Anteil an Personenkilometern, wohingegen eine Veränderung der Anteile am Modal Split nach Fahrten besonders durch hohe Preissenkungen oder gar einem kostenlosen ÖPNV-Angebot hervorgerufen wird. Neben den Autofahrer*innen ändern Fahrradfahrer*innen ihre Mobilitätsart eher als Fußgänger*innen.

4.2.3 Gleichzeitige Verbesserung der Fahrrad- und Businfrastruktur

Nachdem die Maßnahmen einzeln analysiert wurden, wird in einer weiteren Simulationsreihe die gemeinsame Wirkung abgefragt. Dazu wird zunächst die Segmentgruppe mit Auto betrachtet. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden w erden. zeigt den Anteil am Modal Split nach Fahrten in den unterschiedlichen Ausprägungen der Maßnahmen. Es wird deutlich, dass der Einfluss durch die Verbesserung der Businfrastruktur größer ist als der Einfluss durch den Ausbau der Fahrradinfrastruktur. Während der Anteil des MIV um insgesamt 15,8% sowie der des Fahrrads um insgesamt 4,7% abnimmt, steigen die Anteile des ÖPNVs und der Fußgänger*innen um insgesamt 17,5% bzw. 3,2%. Bei allen Verkehrsarten steigt oder sinkt der Anteil am Modal Split linear.

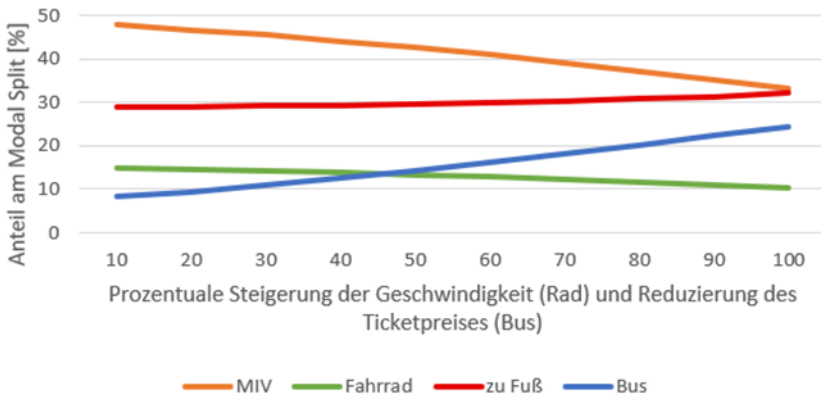

Abbildung 20: Anteil der Verkehrsmittel am Modal Split Fahrten nach Änderung der Fahrradgeschwindigkeit und des ÖPNV-Preises [%]

Die Veränderung des Modal Split nach Personenkilometer ist in Abbildung 21 veranschaulicht. Der Anteil an der durch den MIV zurückgelegten Strecke sinkt bei einer hundertprozentigen Maximierung bzw. Maximierung der Parameter für den Fahrrad- und Busverkehr um ca. 38%. Ebenfalls sinkt der mit dem Fahrrad zurückgelegte Streckenanteil von ca. 7% auf 3%. Der mit dem Bus bewältigte Streckenanteil steigt dafür um ca. 42%.

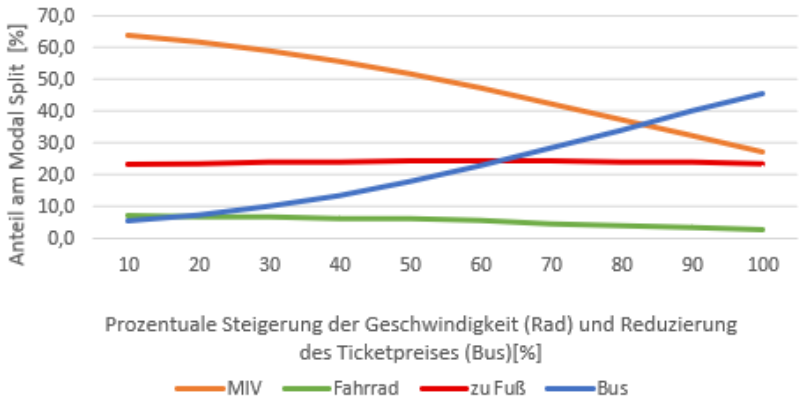

Abbildung 21: Anteil der Verkehrsmittel am Modal Split Pkm nach Änderung der Fahrradgeschwindigkeit und des ÖPNV Preises [%]

Im Nachfragesegment ohne Autobesitz gab es durch die kombinierte Einführung der Maßnahmen lediglich minimale Veränderungen. Während der Anteil des Busses im Modal Split nach Fahrten um 1,8% und der Anteil der Wege zu Fuß um 0,8% anstiegen, sank der Fahrradanteil entsprechend. Bei dem Modal Split nach Personenkilometern kommt es zu einer Steigerung der zu Fuß gegangenen Streckenanteile von 1,3% (vgl. Anhang C.2).

Tabelle 8 stellt die prozentualen Veränderungen gegenüber, welche durch eine vollständige Umsetzung der Maßnahmen erzielt werden. Es wird deutlich, dass Maßnahmen zur Verbesserung des ÖPNV-Netzes einen deutlich höheren Beitrag zur Minimierung des MIV haben als Maßnahmen zu Verbesserung der Fahrrad-

infrastruktur. Letztere steigern den Anteil der Fahrradnutzung, wobei sowohl beim Modal Split nach Fahrten als auch nach Personenkilometern die Hauptminderung in den Anteilen des MIVs stattfindet. In der Maßnahmenkombination kann zwar insgesamt der Anteil am MIV geringfügig stärker reduziert werden, allerdings vermindert sich gleichzeitig der Anteil des Modus ‚Fahrrad'. Demzufolge beeinflussen die Maßnahmen zur Verbesserung der Businfrastruktur die Entwicklung einer ausgeprägten Fahrradnutzung leicht negativ. Allerdings tritt dieser Effekt bei der alleinigen Verbesserung der Businfrastruktur stärker auf, sodass eine Maßnahmenkombination diesem entgegenwirkt. Bei einer kombinierten Umsetzung kann daher eine unterschiedliche Ausprägung der Maßnahmen von Bedeutung sein. Weiterhin ist festzuhalten, dass der ÖPNV ausschließlich bei einer vollständigen Elektrifizierung als klimaneutral gilt, was bei der Umsetzung einer Strategie zur nachhaltigen Mobilität beachtet werden muss.

Tabelle 8: Vergleich der prozentualen Veränderung am Modal Split durch die Einführung der verschiedenen Maßnahmen [%]

[%]	Maximierung der Fahrradgeschwindigkeit		Minimierung des Busticketpreises		Kombination	
	Fahrten	Pkm	Fahrten	Pkm	Fahrten	Pkm
MIV	-0,4	-0,7	-15,7	-38,4	-15,8	-38,4
Fahrrad	0,8	1,1	-5,2	-4,7	-4,7	-4,3
zu Fuß	-0,2	-0,3	3,3	0,8	3,2	0,7
Bus	-0,1	-0,1	17,6	42,2	17,5	41,9

4.3 Szenario 3: Autovermeidung

Im dritten Szenario wurden Maßnahmen untersucht, die aktiv zu einer Minderung der Autonutzung führen sollen, was innerhalb des Modells durch eine Steigerung des Kilometerpreises übersetzt wurde. Abbildung 22 zeigt den Modal Split des Segments Autobesitzer*innen (Fahrten) vom Basisfall sowie den Modal Split nach einer hundertprozentigen Steigerung des Kilometerpreises. Diese führt zu einer Reduzierung des MIV-Anteils von 12,1%, welcher sich stattdessen auf Fahrradfahrer*innen (+3,6%), Fußgänger*innen (+6,6%) und den Bus (+1,9%) verteilt.

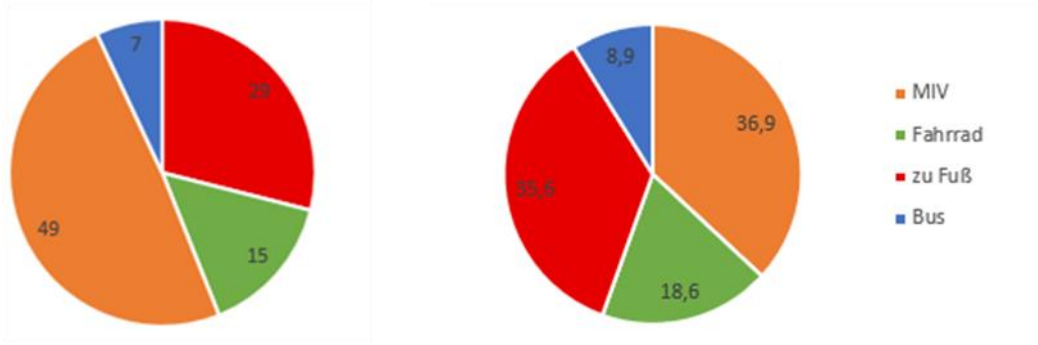

Abbildung 22: Vergleich Modal Split Fahrten Basismodell (links) und Autovermeidung (rechts) im Segment ‚Auto' [%]

Bei dem Modal Split nach Personenkilometern verringert sich der Anteil der durch den MIV zurückgelegten Strecken um ca. 28%. Dieser Anteil wird durch eine Steigerung der Strecken durch den Fußverkehr (+18,5%), den Fahrradverkehr (+6,1%) sowie ÖPNV (+3,4%) ausgeglichen. Da die Maßnahmen zur Autovermeidung ausschließlich eine Veränderung in der Autonutzung bewirken, gibt es innerhalb des Nachfragesegmentes ‚kein Auto' zwischen dem Basisfall und den verschiedenen Simulationen keine Veränderung (vgl. Daten Anhang C.3).

4.4 Szenario 4: Autofrei

Im Szenario Autofrei wurden drei verschiedene Simulationen durchgeführt, die jeweils verschiedene Teile der Stadt Flensburg für die Autonutzung sperren. Da hierbei allein die Bedingungen zur Autonutzung verändert werden, sind die zu beobachtenden Veränderungen im Nachfragesegment der Autobesitzer*innen festzustellen. Die Abbildung 24 zeigt den Modal Split nach Fahrten für den Basisfall und die verschiedenen Ausführungen der für den PKW gesperrten Gebiete. Es wird deutlich, dass die alleinige Sperrung von Straßen oder dem Innenstadtbereich kaum eine Veränderung der Mobilitätsart hervorruft. Erst die vollständige Einschränkung der Autonutzung sorgt für die Veränderung des Modal Splits. Die Wege werden nun hauptsächlich zu Fuß (ca. +29%) und mit dem Fahrrad (ca. +15%) durchgeführt. Bei dem Modal Split nach Personenkilometern ist das Ergebnis sehr ähnlich. Während sich der Anteil, der durch den MIV zurückgelegten Strecke bei einer gesperrten Innenstadt lediglich von 66% auf 64,5% reduziert, bleibt der Anteil durch den MIV bei einem autofreien Tag vollständig aus. Diese erhöhen besonders den Streckenanteil der Fußgänger*innen (ca. +46%) und den der Radfahrer*innen (ca. +14%) (vgl. Daten Anhang C.4).

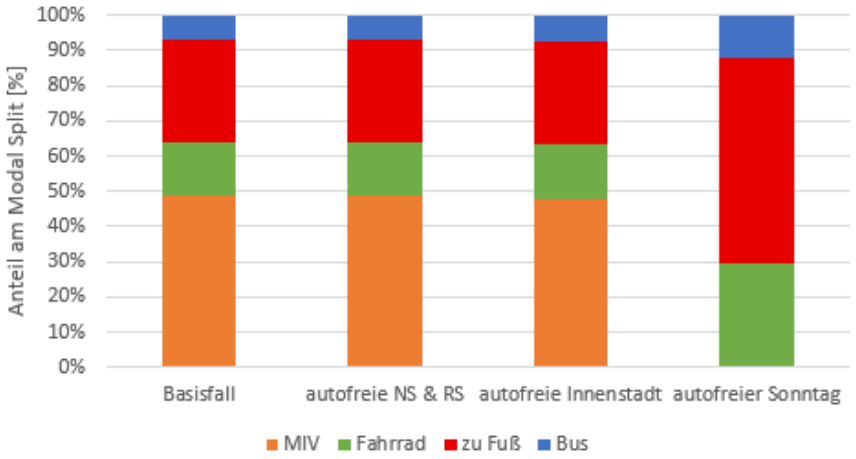

Abbildung 24: Modal Split Autofrei Fahrten [%]

Die geringe Veränderung durch die Errichtung von autofreien Zonen kommt vor allem dadurch zustande, dass der MIV innerhalb des Modells eine andere Route verwendet, um zum gewünschten Ziel zu kommen. Dies wird auch in den Abbildung 23 erkennbar. Im Basisfall verläuft die Route entlang der Straße Schiffbrücke. In der Simulation der autofreien Innenstadt wird dieses Gebiet mühelos umfahren. Für eine erfolgreiche Implementierung dieser Maßnahme muss daher unbedingt beachtet werden, dass mögliche alternative Routen so angepasst werden, dass der Nutzen dieser geringer ist als der der übrigen Mobilitätsarten, welche die gesperrte Zone weiterhin durchqueren können. Ansonsten umfahren die Autofahrer*innen größtenteils die gesperrte Zone, was bei den entsprechenden Straßen zu einem erhöhten Stauaufkommen führen kann, sofern diese nicht an den Verkehrsstrom angepasst sind.

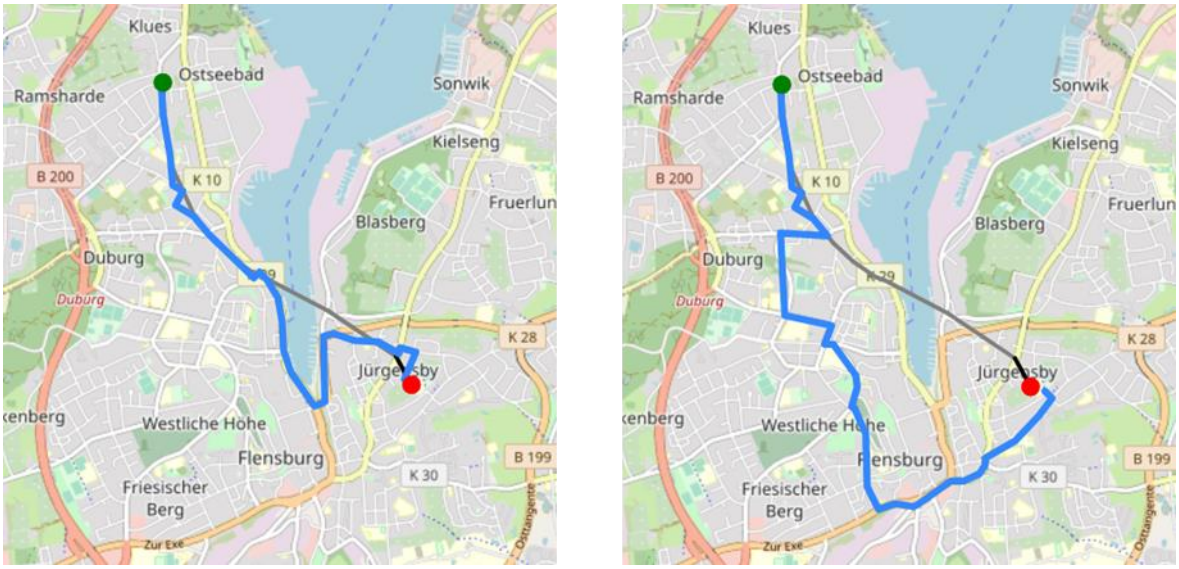

Abbildung 23: Route des MIV von Zone 3 zu Zone 10 im Basisfall (links) und Szenario 4.B (rechts)

4.5 Szenario 5: Kombination

In Szenario 5 werden die verschiedenen Maßnahmen vereint, um die gemeinsame Wirksamkeit zu analysieren. Die Maßnahme des autofreien Tags ist zunächst im Szenario enthalten, um die verschiedenen Modal Splits ohne Autonutzung zu erhalten. Im Anschluss wird die Maßnahme des autofreien Tags durch die Maßnahme der autofreien Innenstadt ersetzt, da diese zum einen temporär gilt und zum anderen zur Untersuchung der Wirksamkeit der übrigen Maßnahmen dient.

4.5.1 Szenario 5.A mit autofreiem Tag

In dieser Simulationsreihe kann durch die Maßnahme des autofreien Tags der Anteil des MIVs am Modal Split auf null gesenkt werden. In Abbildung 25 ist zunächst die Veränderung des Modal Split nach Fahrten für das Nachfragesegment der Autobesitzer*innen gezeigt. Bis zu einer prozentualen Änderung der Parameter von ±30% ändern sich die verschiedenen Anteile nahezu gleichmäßig. Dabei kommt es zu einer Abnahme des MIV-Anteils und einer Zunahme der Anteile für die Modi ‚zu Fuß' und ‚Bus'. Der Anteil der genutzten Fahrräder bleibt ungefähr konstant. Ab der prozentualen Veränderung der Parameter von ±40% bis einschließlich ±70% verstärkt sich die Reduzierung des MIV-Anteils am Modal Split. Gleichzeitig erhöht sich die Steigung des ÖPNV-Anteils leicht. Während die Steigung des Anteils an Fußgänger*innen konstant bleibt, kommt es zu einer minimalen Verringerung des Fahrrad-Anteils. Grund für diese Veränderung kann vor allem die Erweiterung des autofreien Bereichs von zwei Straßen auf den kompletten Innenstadtbereich sein.

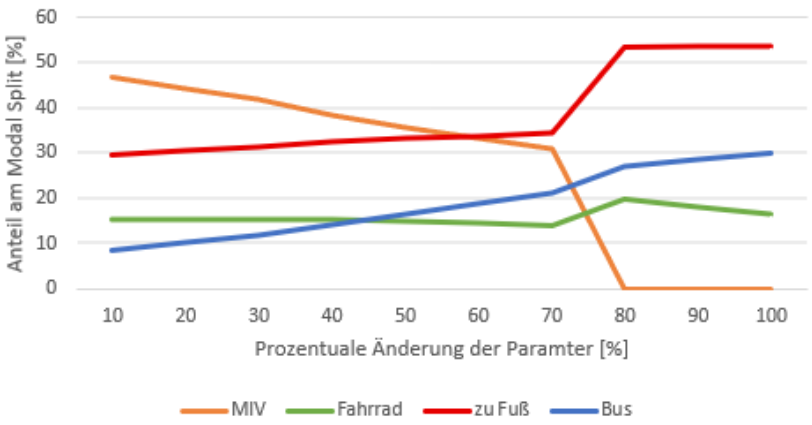

Abbildung 25: Modal Split Fahrzweck Kombination, Autobesitz, autofreier Tag [%]

Ab einer Veränderung der Modellparameter von ±80% wirkt die Maßnahme ‚autofreier Tag', weshalb der Anteil des MIVs sprungartig auf null zurückgeht. Dies hat zur Folge, dass sich die Anteile der übrigen Verkehrsarten erhöhen, wobei besonders der Anteil an Fußgänger*innen steigt. Letzterer erreicht bei ca. 53% eine

Art Sättigung, da der Wert bei der Veränderung um ±90% bzw. ±100% konstant bleibt. Im Gegenzug dazu steigt der Bus-Anteil weiterhin auf insgesamt 30%, was zu einer Minimierung der Fahrradfahrer*innen führt. Damit steigt der Fahrrad-Anteil während der gesamten Simulationsreihe um lediglich 1,6%.

Abbildung 26 zeigt die Veränderung des Modal Splits nach Personenkilometer. Der Einfluss des vierten Szenarios (autofrei) wird auch hier durch die Steigungsänderung nach ±30% bzw. nach ±70% deutlich. Der Rückgang der Strecke, die durch den MIV zurückgelegt wird, gleicht sich vor allem durch die Zunahme des Bus-Anteils aus, sodass dieser schlussendlich von 4% auf ca. 49% ansteigt. Ebenfalls vergrößert sich der Streckenanteil durch Fußgänger*innen um ca. 23%, wohingegen der mit dem Fahrrad zurückgelegte Streckenanteil um ca. 2% sinkt.

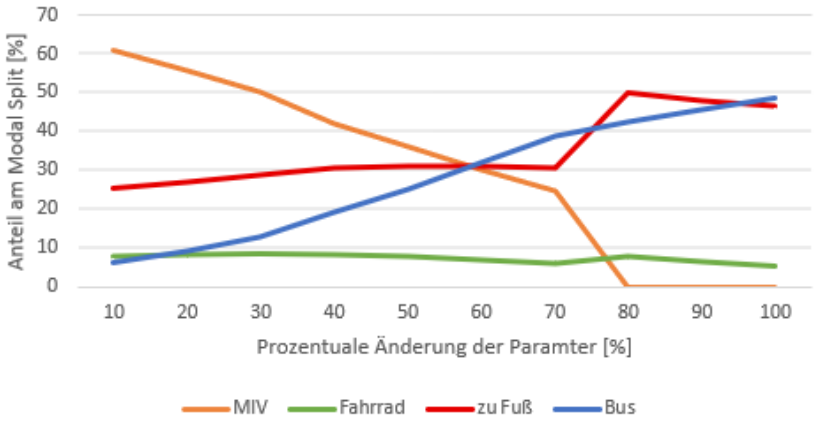

Abbildung 26: Modal Split Pkm Kombination, Autobesitz, autofreier Tag [%]

Im Nachfragesegment ohne Auto gibt es im Verlauf des Szenarios wenig Änderungen. Im Modal Split nach Fahrten steigt der ÖPNV-Anteil von 46,3% auf 48% und der zu-Fuß-Anteil von ca. 39% auf 40%. Dementsprechend reduziert sich der Anteil des Fahrrads am Modal Split (vgl. Anhang C.5).

Teil des kombinierten Szenarios ist das 9€-Ticket, weshalb es in diesem Szenario ebenfalls die Nachfragesegmente ‚Ticketbesitzer*in' und ‚kein Ticket' gibt. Die prozentuale Veränderung der Modellparameter hat auch geringfügige Auswirkungen auf die Nutzung des 9€-Tickets. Die Auswirkungen durch die maximale Veränderung der Parameter wurden daher in Tabelle 9 festgehalten. Weil es im Basisfall kein 9€-Ticket gibt, werden die Ergebnisse aus dem Szenario 1 als Referenz verwendet.

Tabelle 9: Prozentuale Veränderung des Szenarios 1 durch Einfluss der weiteren Maßnahmen auf die Nutzung des 9€-Tickets in Szenario 5 autofreier Tag

[%]	9€-Ticket		Kein 9€-Ticket	
	Modal Split Fahrten	Modal Split (Pkm)	Modal Split Fahrten	Modal Split (Pkm)
MIV	-10,4	-2	-26,4	-22,6
Fahrrad	2,8	2	5,8	4,9
zu Fuß	11,3	7,7	13,1	12,4
Bus	-3,7	-7,7	7,4	5,3

Durch den autofreien Tag sinken sowohl im Segment mit als auch ohne Ticket der Anteil des MIV im Modal Split nach Fahrten sowie Personenkilometer auf null. Interessant ist, dass im Segment der Ticketbesitzer*innen der Bus-Anteil vom Modal Split nach Fahrten und Personenkilometer ebenfalls abnimmt. Diese Reduktion wird vor allem durch einen Anstieg des Anteils ‚zu Fuß' ausgeglichen. Im Segment ohne 9€-Ticket führt die Abnahme des MIVs zu einer Umverteilung der entsprechenden Anteile am Modal Split auf die übrigen Verkehrsmodi. Sowohl beim Modal Split nach Fahrten als auch nach Personenkilometer gibt es den höchsten Zuwachs mit 13,1% bzw. 12,4% beim Anteil der Fußgänger*innen.

4.5.2 Szenario 5.B ohne autofreien Tag

Zur Überprüfung der Wirksamkeit des gesamten Maßnahmenpakets wurde Szenario 5 auch ohne den autofreien Tag simuliert, da es sich hierbei um eine temporäre Maßnahme handelt. Besonders in der Segmentgruppe mit Auto verändert dies den Ausgang des Szenarios. Der Verlauf des Modal Splits nach Fahrten ändert sich insofern, dass die einzelnen Anteile sich bei der Maßnahmenimplementierung von ±80% nicht sprunghaft ändern, sondern gleichmäßig weiter steigen bzw. sinken. Der finale Modal Split ist in Abbildung 27 zu sehen.

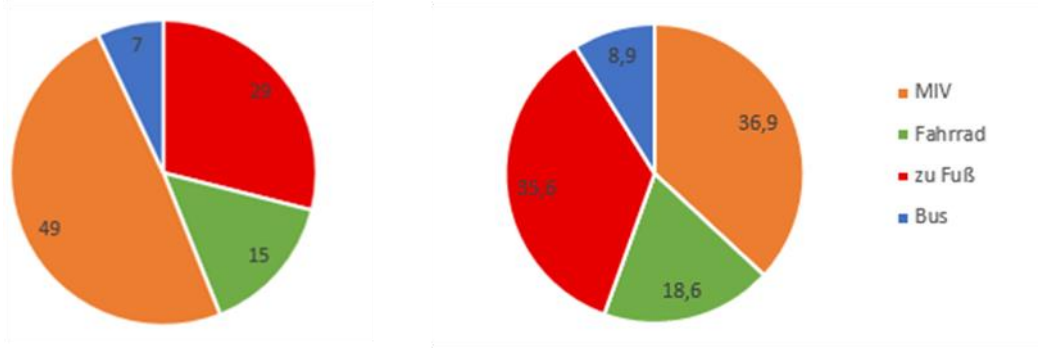

Abbildung 27: Vergleich Modal Split Fahrten Basismodell (links) und Kombination autofreie Innenstadt (rechts) im Segment ‚Auto' [%]

Im Vergleich zum Basisfall wurde der Anteil des MIV um ca. 25% reduziert. Ebenfalls reduziert hat sich der Fahrrad-Anteil, von 15% auf ca. 12%. Im Gegenzug hat sich der Anteil an zu Fuß zurückgelegter Wege um ca. 8% erhöht und der ÖPNV-Anteil von 7% auf 21% abgesenkt.

Der Verlauf der Mobilitätsarten am Modal Split ändert sich auch bei der Auswertung nach Personenkilometern. Wie in Abbildung 28 zu erkennen ist, gibt es auch hier keine bedeutsame Veränderung in der Steigung bei ±80% Implementierung. Den größten Streckenanteil, welcher im Basisfall durch den MIV entstanden ist, wird nun durch den Bus ersetzt. Der Streckenanteil durch den ÖPNV steigt von anfangs 4% auf ca. 56%. Der zu Fuß gegangene Streckenanteil steigt zunächst leicht an, um ab ±60% nahezu auf den Anfangswert zurückzufallen. Kontinuierlich sinkt der Anteil des Fahrrads um ca. 4%.

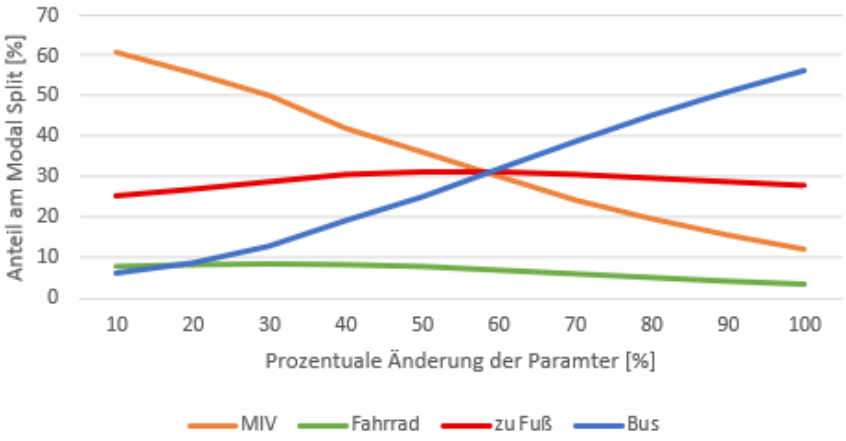

Abbildung 28: Modal Split Pkm Kombination autofreie Innenstadt im Segment ‚Auto' [%]

Im Nachfragesegment ‚ohne Auto' gibt es durch den Austausch des autofreien Tags mit der autofreien Innenstadt fast keine Veränderung. Im Modal Split nach Personenkilometern steigt jedoch der Streckenanteil, welcher mit dem Bus zurückgelegt wurde, um 1,1%. Dieser war ursprünglich dem Fahrradanteil zugeordnet.

Die Ergebnisse aus den Nachfragesegmenten mit bzw. ohne 9€-Ticket sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Hier werden die Ergebnisse aus Szenario 1 mit denen aus dem kombinierten Szenario 5 mit autofreier Innenstadt prozentual verglichen. In allen Fällen sinkt der Anteil des MIVs ab. In dem Segment ‚kein Ticket' führt die Minderung des MIVs sowohl im Modal Split nach Fahrten als auch Personenkilometern zu einer Umverteilung auf die übrigen Mobilitätsarten. Dadurch nimmt vor allem der Anteil vom ÖPNV. In dem Segment ‚9€-Ticket' kommt es zusätzlich zu einer Reduzierung des Bus-Anteils und einem Zuwachs des Anteils an Fußgänger*innen im Modal Split nach Fahrten und Personenkilometern.

Tabelle 10: Prozentuale Veränderung des Szenarios 1 durch Einfluss der weiteren Maßnahmen auf die Nutzung des 9€-Tickets in Szenario 5 autofreie Innenstadt

[%]	9€-Ticket		Kein 9€-Ticket	
	Modal Split Fahrten	Modal Split Pkm	Modal Split Fahrten	Modal Split Pkm
MIV	-4,1	-2,0	-14,7	-19,1
Fahrrad	-0,1	0,2	0,9	4,4
zu Fuß	6,4	3,5	6,9	8,6
Bus	-2,0	-2,4	6,8	6,1

4.6 Gegenüberstellung und Zwischenfazit

In diesem Abschnitt werden nun die einzelnen Szenarien miteinander verglichen, zunächst einzeln und anschließend in Szenario 5, um die Wechselwirkung aller vier Szenarien aufeinander zu analysieren. Dazu wurde der Modal Split (Fahrten & Personenkilometer) jeweils mit der maximalen Maßnahmenimplementierung der Szenarien verglichen, indem die gesamte prozentuale Veränderung der einzelnen Anteile errechnet wurde. Da im Szenario 1 weitere Nachfragesegmente hinzugekommen sind, welche in den anderen Szenarien nicht existieren und es in den Segmenten ohne bzw. mit Auto im Verlauf keine Veränderung gegeben hat, wird dieses Szenario an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

Tabelle 11 vergleicht die Auswirkungen der Szenarien ohne den autofreien Tag. Betrachtet man zunächst die Szenarien 2 - 4 kann durch die Maßnahmen in Szenario 2 mit -15,8% (Fahrten) und -38,4% (Pkm) die größte Reduktion des MIVs bewirkt werden, ausschlaggebend hierfür ist insbesondere die vermehrte Nutzung des Busses. Es folgt Szenario 3, in dem die Reduktion des MIVs besonders durch die Anteile an Fußverkehr ausgeglichen wird. Die größte Veränderung wird in Szenario 5 – dem Maßnahmenmix – erzielt. Die Reduktion vom Anteil des MIVs am Modal Split nach Fahrten ist um ca. 10% höher als von Szenario 2Mix. Beim Modal Split nach Personenkilometer sind es ca. 15%. Dies verdeutlicht, die Notwendigkeit für eine nachhaltige Mobilitätsstrategie. Verschiedene Maßnahmen müssen parallel gefördert und umgesetzt werden. Wie bei der in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Analyse des Szenario 2 dargestellt, wirkt sich die Förderung des ÖPNVs leicht negativ auf den Fahrradverkehr aus. In Kombination mit dem Szenario 3 und 4.B kann dies jedoch etwas ausgeglichen werden. Weiterhin steht fest, dass durch die Kombination der vier Szenarien ebenfalls der ÖPNV stärker gefördert wird. Besonders im Modal Split

nach Personenkilometern wird der gesunkene Anteil des MIVs fast vollständig durch den Bus ersetzt. Im direkten Vergleich macht sich zudem erneut bemerkbar, dass das Szenario 4.B (autofreie Innenstadt), kaum eine Auswirkung auf den Modal Split hat.

Tabelle 11: Ergebnisvergleich der Szenarien 2Mix, 3, 4.B. & 5.B [%]

Nr.	2Mix		3		4.B		5.B	
Segment	Auto	kein Auto	Auto	kein Auto	Auto	kein Auto	Auto	kein Auto
Modal Split Fahrten [%]								
MIV	-15,8	0,0	-12,1	0,0	-1,0	0,0	-25,4	0,0
Fahrrad	-4,7	-2,5	3,6	0,0	0,3	-0,1	-3,2	-2,6
zu Fuß	3,0	0,8	7,0	0,0	1,0	0,0	8,0	0,8
Bus	17,5	1,8	1,9	0,0	0,2	0,1	20,8	1,8
Modal Split Personenkilometer [%]								
MIV	-38,4	0,0	-28,1	0,0	-1,3	0,0	-53,6	0,0
Fahrrad	-4,3	-1,0	6,1	0,0	0,2	-0,3	-3,8	-1,2
zu Fuß	0,7	1,3	18,5	0,0	0,6	-1,2	5,0	0,0
Bus	41,9	-0,3	3,4	0,0	0,4	1,5	52,3	1,1

In Tabelle 12 werden als nächstes die Szenarien 4.C und 5.A verglichen, welche beide die Maßnahme ‚autofreier Tag' beinhalten. Während in Szenario 4.C der Anteil des MIVs am Modal Split (Fahrten & Pkm) vor allem durch die Modi ‚Fahrrad' und ‚zu Fuß' ausgeglichen werden, kommt dem Modus ‚Bus' im Szenario 5 eine wichtige Bedeutung zu. Dies kommt durch die Maßnahmen zur Förderung der Businfrastruktur zustande. Szenario 4.C zeigt im Gegensatz zu Szenario 5 ausschließlich Veränderungen im Segment ‚Auto'. Die Veränderungen im Segment ‚kein Auto' in Szenario 5.A resultieren ausschließlich aus dem Einfluss der anderen Szenarien. Es veranschaulicht, dass Maßnahmen, die ausschließlich auf eine Veränderung der Autonutzung abzielen, im Segment ohne Auto keine Wirkung auf die Auswahl der Mobilitätsart haben. Im Umkehrschluss bedeutet dies auch, dass Maßnahmen spezifisch sein müssen, um die gewünschte Veränderung zu erzielen.

Tabelle 12: Ergebnisvergleich der Szenarien 4.C & 5.A [%]

Nr.	4.C		5.A	
Segment	Auto	kein Auto	Auto	kein Auto
Modal Split Fahrten [%]				
MIV	-49,0	0,0	-49,0	0,0
Fahrrad	14,7	0,0	1,6	-2,5
zu Fuß	29,0	0,0	25	0,8
Bus	5,2	0,0	23	1,7
Modal Split Personenkilometer [%]				
MIV	-65,8	0,0	-65,8	0,0
Fahrrad	13,6	0,0	-2,1	-1,0
zu Fuß	46,3	0,0	23,3	1,3
Bus	5,7	0,0	44,5	-0,3

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Kombination an Maßnahmen bzw. ein breites Maßnahmenpaket deutlich effektiver ist als die Fokussierung auf eine einzelne Maßnahme. Die in dieser Analyse ausgewählten Änderungen der Parameter reichen nicht aus, um den MIV vollständig durch die übrigen Mobilitätsarten zu ersetzen. Hierfür ist die Ergänzung der temporären Maßnahme ‚autofreier Tag' notwendig oder eine andere Regelung zur Einschränkung der Autonutzung. Ein gut ausgebauter ÖPNV erzielt ansonsten den höchsten Effekt, ins besonders beim Modal Split nach Personenkilometern ist dies erkennbar. Jedoch führt eine bessere ÖPNV-Infrastruktur auch zu einem leichten Rückgang des Anteils der Fahrradfahrer*innen. Bei der parallelen Umsetzung der Maßnahmen sollte die Verhältnismäßigkeit gewahrt werden, sodass für die Förderung des Fahrradanteils ein bestmögliches Ergebnis erzielt werden kann. Innerhalb des Modells ist auch der Modus ‚zu Fuß' eine attraktive Alternative zum Auto. Dies ist auch auf die gesetzten Systemgrenzen, die damit verbundenen kurzen Strecken sowie die Kalibrierung zurückzuführen. Das Errichten von autofreien Zonen kann sinnvoll sein, um z.B. Luft- und Lebensqualität oder Verkehrssicherheit zu erhöhen. Es sorgt jedoch nicht automatisch für eine Reduktion des MIV, da die entsprechenden Zonen umfahren werden. Bei schlechter Planung könnte dies zu Überlastungen der Alternativstrecken führen. Der Einfluss vom 9€-Ticket bietet keine Vergleichswerte zu den anderen Szenarien. Trotzdem ist

durch die Modellergebnisse davon auszugehen, dass der ÖPNV-Anteil bei einer Einführung stark ansteigt und große Anteile der übrigen Verkehrsmodi, vor allem dem MIV, übernimmt. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit den aktuellen Erkenntnissen zur Nutzung des deutschlandweiten 9€-Tickets. Innerhalb der drei Monate ist der Anteil des MIVs um 10% zurückgegangen, wodurch ca. 1,8 Mio. t CO_2 eingespart wurden (NDR/ARD-aktuell 2022).

4.7 Weiterführende Veränderungen

Eine Umstellung des bisherigen Verkehrssystems zu Gunsten von nachhaltiger Mobilität bringt Veränderungen verschiedener Arten mit sich. Die Art und Weise wie wir uns fortbewegen und das daraus resultierende Mobilitätssystem beeinflussen nicht nur die THG-Emissionen, sondern z.B. auch die Verkehrssicherheit, Lebensqualität und Raumnutzung. Veränderungen in diesen Bereichen, die durch das Umsetzen des Szenarios 5.B in der Stadt auftreten könnten, werden hier aufgeführt.

4.7.1 THG-Emissionen

Im Basisfall lag der Anteil des motorisierten Verkehrs (MIV und ÖPNV) am Modal Split (Fahrten) bei 56% und in Szenario 5 bei 51,4%. Der summierte Anteil des motorisierten Verkehrs hat sich nur geringfügig verändert, jedoch gibt es eine wesentliche Veränderung bei den jeweiligen Anteilen von MIV und ÖPNV. Während im Basisfall der MIV bei 49% und der ÖPNV 7% liegt, betragen die Anteile in Szenario 5 27,8% ÖPNV und 23,6% MIV. Die Klimawirkung im Nahverkehr Deutschlands durch den Linienbus beträgt ca. 88g $CO_{2\text{-eq.}}$-Emissionen je Personenkilometer, wohingegen der Wert beim PKW bei ca. 194g $CO_{2\text{-eq.}}$-Emissionen je Personenkilometer liegt, dies stellt eine Verdoppelung des Wertes dar (Allekotte et al. 2020). Die Fahrzeugnutzung und die Herstellung von PKW sind die wesentlichen Treiber für die negative Klimawirkung. Durch die nicht-motorisierten Mobilitätsarten hingegen entstehen z.B. bei Herstellung von Fahrrädern lediglich Emissionen in Höhe von ca. 9g $CO_{2\text{-eq.}}$-Emissionen je Personenkilometer. Ähnlich verhält es sich bei Emissionen durch Stickoxide (NO_x) bzw. Feinstaub (PM_{10}). Die spezifischen NO_x-Emissionen je Personenkilometer betragen für den PKW 0,53g NO_x, für den Nahlinienbus 0,4g NO_x wohingegen für das Fahrrad nur ein Wert von 0,02g NO_x aufgezeigt wird. Die spezifischen PM_{10}-Emissionen je Personenkilometer liegen für den PKW bei 0,07g PM_{10}, für den Nahlinienbus bei 0,025g PM_{10} und für das Fahrrad bei 0,011g PM_{10} (Allekotte et al. 2020). Demnach würde die Umsetzung von Szenario 5 in der Stadt Flensburg zu einer massiven Reduzierung der THG-

Emissionen führen, obwohl sich der Anteil an motorisierten Mobilitätsarten insgesamt nur wenig verringert hat.

4.7.2 Raumnutzung und Lebensqualität

Ein gut ausgebautes Verkehrsnetz benötigt große Flächen, wodurch häufig Ökosysteme verändert oder ganz zerstört werden. Dies kann unter anderem zum Verlust der Biodiversität führen und irreversible Schäden herbeiführen. Die ökologische Wirkung ausgehend von der Infrastruktur ist abhängig vom ursprünglichen Zustand der Fläche. Eine genaue analytische Betrachtung kann hier nur umfangreich und äußerst detailliert erfolgen. Daher wird an dieser Stelle die durchschnittliche Flächenbelegung des Personenverkehrs betrachtet, welche sich an der Nutzung der jeweiligen Infrastrukturart orientiert. Dazu gehören Verkehrs- und Industriewege, welche oft versiegelt sind und daher einen geringen oder keinen Umweltnutzen haben, sowie Böschungen, die eine höhere ökologische Qualität aufweisen. Die durchschnittliche Flächenbelegung im Jahr 2017 im Personenverkehr für den Linienbus im Nahverkehr beträgt ca. 715m²a/Mio. Pkm, der PKW liegt bei ca. 2211m²a/Mio. Pkm und das Fahrrad bei nur ca. 329m²a/Mio. Pkm (Allekotte et al. 2020). Damit ist die Belegung durch den PKW ca. dreimal so hoch wie die des Linienbusses und beinahe siebenmal höher als die des Fahrrads.

Für die Stadt Flensburg würde demnach eine Mobilitätsentwicklung wie in Szenario 5 dazu führen, dass der zurzeit für das Verkehrsnetz verwendete Raum besser verteilt werden könnte. Da für den Umweltverbund deutlich weniger Fläche benötigt wird, könnte diese dann anders verwendet werden, z.B. zu Gunsten der Biodiversität und der Lebensqualität. Eine gute Möglichkeit hierfür ist die Umgestaltung des Stadtbildes, in dem mehr Grünflächen entstehen und der Raum nicht primär für den Verkehr zur Verfügung steht. Vielmehr könnte dieser Raum für andere Daseinsgrundfunktionen, wie z.B. Erholung oder kommunales Leben, verwendet werden. Langfristig würde dies zur Reduktion der THG beitragen, die Luftqualität und das Stadtklima verbessern sowie zu einer gesteigerten Lebensqualität für alle führen.

4.7.3 Verkehrssicherheit

Im Jahr 2021 gab es in Deutschland über 250.000 Verkehrsunfälle, bei denen es zu Personenschäden gekommen ist. Zu den Hauptverursachern gehören mit ca. 161.000 Unfällen die PKWs, was ca. 64% der gesamten Unfälle entspricht (Statistisches Bundesamt 2022b). Die Anzahl der Unfälle, bei denen der Hauptverursacher das Fahrrad war, lag bei ca. 45.000, bei denen mit Fußgänger*innen bei ca. 6.000 und bei denen mit Bussen als Hauptverursacher bei

nur ca. 2.000. Des Weiteren werden Krafträder und Güterkraftfahrzeuge aufgeführt. Verkehrsunfälle sind komplex und haben verschiedene Ursachen, dennoch wird deutlich, dass durch den PKW deutlich mehr Unfälle mit Personenschäden verursacht werden als durch alle anderen Mobilitätsarten zusammen. Demzufolge würde eine Reduktion des PKW-Verkehrs zu einer Abnahme der gesamten Verkehrsunfälle führen.

Innerhalb der Beschreibung zu den verschiedenen Klimapolitikmaßnahmen wurde zur Verbesserung der Infrastruktur des Fahrrad- und Fußverkehrs, die bauliche Trennung zum motorisierten Verkehr beschrieben. Dies kann nicht nur für eine schnellere Fortbewegung sorgen, sondern würde auch die Verkehrssicherheit erhöhen. Auf Grund der veränderten Raumnutzung wäre auch in Städten wie Flensburg die Möglichkeit gegeben, solche Baumaßnahmen umzusetzen. Insgesamt ist davon auszugehen, dass eine Mobilität wie in Szenario 5 dazu beiträgt Mobilität im Stadtbereich sicherer zu gestalten und Verkehrsunfälle zu reduzieren.

5 Diskussion und Interpretation

In diesem Kapitel werden die Modellergebnisse vor dem Hintergrund der Forschungsfragen interpretiert und diskutiert. Diese werden anschließend in Zusammenhang mit dem Flensburger Kontext genannt und daraufhin Handlungsempfehlungen formuliert. Außerdem wird auf Ungenauigkeiten innerhalb des Modells und Unsicherheiten der Daten hingewiesen. Abschließend wird ein Ausblick über den weiteren Forschungsbedarf aufgezeigt.

5.1 Ergebnisse im Flensburger Kontext

Die im Modell verwendeten Maßnahmen sind nicht identisch mit denen der Stadt Flensburg, bieten dennoch einen guten Einblick, da sie sich zum einen an den Flensburger Maßnahmen orientieren und zum anderen teilweise ambitionierter sind, z.B. durch den kostenlosen ÖPNV oder den autofreien Tag.

Maßnahmen zur Förderung des Umweltverbundes eignen sich besonders gut zum Umsetzen einer nachhaltigen Mobilität. In Bezug auf die Stadt Flensburg müssen Maßnahmen zur Förderung des ÖPNV-, Fahrrad- und Fußverkehrs besondere Aufmerksamkeit erhalten und schnell umgesetzt werden. Je attraktiver die Alternativen zum PKW in der Stadtmobilität ausgestaltet sind, desto einfacher ist es auf diese umzusteigen. Im Masterplan Mobilität 2030 der Stadt Flensburg sind 85 Maßnahmen aufgelistet von denen 34 ausschließlich für den Fahrrad- und Fußverkehr vorgesehen sind, 15 betreffen den Busverkehr und die übrigen sind entweder für den PKW oder Mischformen, die bauliche bzw. organisatorische Themen im Fokus haben (Stadt Flensburg 2018). Die parallele Förderung des Umweltverbundes und Reduzierung der Autonutzung ist äußerst komplex und kann nicht immer zu gleichen Teilen umgesetzt werden. Dennoch ist es für die Stadt Flensburg empfehlenswert, besonders innerhalb des Stadtgebietes den Umweltverbund deutlich stärker zu fördern. Hier werden häufig nur kurze Strecken zurückgelegt, welche verhältnismäßig einfach vom MIV auf Alternativen umgestellt werden können. Eine deutliche personelle Vergrößerung könnte der Stadt helfen, die verschiedenen Punkte mit der nötogen Tiefe zu implementieren, sodass innerhalb des kurzen Zeitrahmens bis 2030 große Veränderungen vorgenommen werden können.

Insgesamt ist offensichtlich, dass eine drastische Veränderung der Mobilitätsinfrastruktur schwierig und eher langsam von statten geht. Besonders Maßnahmen wie der autofreie Tag können in der Gesellschaft auf breite Kritik und Widerstand stoßen. Daher ist es umso wichtiger ein einheitliches Konzept zu nutzen,

welches die gesamte Stadtentwicklung auch über den Verkehrssektor hinaus in den Blick nimmt. Die Stadt Flensburg sollte dennoch weitreichendere Maßnahmen in Betracht ziehen und hierbei die Bevölkerung in den Prozess mit einbinden. Was der Stadt bei solchen Maßnahmen helfen könnte, ist eine Obergrenze für den MIV zu definieren, sodass vorgegeben ist auf welchen Straßen wie viele PKWs pro Tag fahren dürfen. Ein weiteres wichtiges Mittel zur Umsetzung der Ziele ist die Elektrifizierung von sämtlichen Fahrzeugen. Innerhalb des Modells ist diese nicht betrachtet worden, da es hier keine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Antriebsarten gibt. In der Stadt Flensburg ist diese besonders wichtig, um den übrigen MIV klimaneutral zu gestalten. Eine Begrenzung des MIV könnte ebenfalls durch einen festgelegten Anteil an elektrischen Fahrzeugen vorangebracht werden. Für Klimaneutralität ist es ausschlaggebend, dass die benötigte Energie aus erneuerbaren Energiequellen bezogen wird.

5.2 Kritische Reflexion

Für eine Einordnung der Ergebnisse ist es von besonderer Bedeutung die Vorgehensweise und das Modell kritisch zu betrachten. Die Verwendung eines Verkehrsmodells bringt viele Vorteile mit sich, jedoch verfügt es parallel auch nur über eine feste Anzahl an Parametern. Dadurch kann nicht jede klimapolitische Maßnahme auf gleiche Art und Weise in das Modell integriert werden und teilweise die gleichen Parameter für verschiedene Maßnahmen angepasst werden. Die Variation der ausgewählten Maßnahmen hat zur Folge, dass die Ausprägungen mancher Maßnahmen kontinuierlich verändert werden konnten, wobei andere Maßnahmen nur einen konstanten Zustand beschreiben. Die weitgefächerten Maßnahmen wurden möglichst logisch und vergleichbar in verschiedenen Szenarien zusammengefasst. Um Ausprägungen der Szenarien vergleichen zu können, wurden die entsprechenden Parameter kontinuierlich um 100% maxi- bzw. minimiert. Die Parameter, die minimiert wurden, erreichten dementsprechend den Wert null und die Parameter, die maximiert wurden, verdoppelten sich. Demnach wurden die maximierten Parameter gegebenenfalls nicht ausreichend ausgereizt und eine weitere Steigerung wäre möglich.

Außerdem ist festzuhalten, dass das Modell durch die bereits beschriebenen Limitierungen und Systemgrenzen beschränkt ist. Daher ist eine Anwendung außerhalb dieses Bereiches nicht möglich. Dazu zählt der Verkehr, der den Start- oder Zielpunkt außerhalb der Stadtgrenzen hat, z.B. in die umliegenden urbanen Räume und der Fernverkehr oder Tourismus von oder nach Dänemark. Um das Modell möglichst genau zu gestalten, wurden verschiedene Datenquellen der Stadt

Flensburg, aus der MiD 2017 sowie der EnSu Mobilitätsumfrage verwendet. Dadurch verfügen die Daten über eine unterschiedliche Qualität. Infolgedessen konnte die Kalibrierung des Modells nicht so präzise wie erwartet durchgeführt werden, da hierfür Datensätze regellos angepasst hätten werden müssen. Eine starke Abweichung in den Ergebnissen ist dadurch im Fußverkehr zu erkennen. Dies sollte bei zukünftiger Nutzung des Modells beachtet und falls möglich ausgeglichen werden.

5.3 Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Während der Ausarbeitung sind weitere Themenbereiche aufgetaucht, die für die Entwicklung von nachhaltiger Mobilität von Bedeutung sein können und daher zusätzlich erforscht werden sollten bzw. das Modell für eine solche Analyse entsprechend weiterentwickelt werden müsste.

Zuerst sollten der ausgewählte Mobilitätsbereich innerhalb des Modells sowie das Verkehrsnetz erweitert werden. Das bedeutet, dass das Umlandgebiet der Stadt Flensburg erfasst und zu mindestens einer Zone umgeformt. Auf diese Weise können auch Pendlerverkehr und Strecken von höherer Distanz abgebildet werden. Eine Erweiterung des Verkehrsnetzes könnte die Aufnahme von anderen Mobilitätsmodi aus dem Bereich der Mikromobilität oder die stärkere Differenzierung der bereits vorhandenen Modi, beim Fahrrad das Pedelec oder beim Auto der elektrische Antrieb, sein. Zum einen wird hier durch das Modell realitätsnäher dargestellt und zum anderen können Maßnahmen spezifischer untersucht und in der Realität gefördert werden. Der Pfadfinder im Modell wählt grundsätzlich den kürzesten Weg, um vom Start zum Ziel zu gelangen. Die Implementierung weiterer Segmente z.B. anhand soziodemographischer Daten, würde dazu führen, dass eine Unterscheidung nach Faktoren wie Alter oder Einkommen möglich wären und damit insgesamt differenzierter analysiert werden kann. Hierfür würden allerdings sehr spezifische Daten benötigt werden. Weiterhin können neben dem Modal Split weitere Grafiken ausgegeben werden, sodass auch andere Fragestellungen bearbeitet werden könnten. Von Interesse für die Stadt Flensburg könnten z.B. die Ausweitung des ÖPNVs mittels einer Straßenbahn und einer Fähre sein aber auch der Einfluss des Pendlerverkehrs für die gesamte Stadtmobilität und die Frage durch welche spezifischen Maßnahmen dieser beeinflusst werden kann.

6 Zusammenfassung

Den Verkehrssektor zu Gunsten von nachhaltiger Mobilität umzugestalten ist eine komplexe und intersektionelle Aufgabe, aber im Anbetracht der Klimakrise ein absolut essenzielles Vorhaben. Die Bundesregierung und auch Entscheidungsträger*innen der Stadt Flensburg haben Maßnahmenpläne ausgearbeitet, um die CO_2-Emissionen durch den Verkehrssektor marginal zu senken. In Flensburg konnten bisher nur wenige messbare Resultate erzielt werden. Das in dieser Arbeit erstellte Verkehrsmodell bildet einen Teil der Verkehrssituation der Stadt ab und zeigt ebenfalls, dass die implementierten Maßnahmen vielfältig und drastisch sein müssen, um einen erkennbaren Effekt zu erzielen. Eine große Auswahl an Maßnahmen sorgt dafür, dass jede Komponente des Mobilitätssystems individuell gefördert oder blockiert werden kann. Die Ausprägung der Maßnahmen ist insofern relevant als dass der resultierende Effekt durch die Intensität erhöht werden kann und zudem in der Gesellschaft ein deutliches Signal senden könnte. Bei den Simulationen wurde dies besonders deutlich durch die Maßnahmen autofreier Tag, kostenloser ÖPNV und die Verdoppelung der PKW-Betriebskosten. Im Flensburger Modell konnte bei der kombinierten Integration der Maßnahmen (Szenario 5.B) der Anteil des MIVs am Modal Split (Fahren) um -25,4% und der Fahrradverkehr um -3,2% gesenkt werden, wobei gleichzeitig der ÖPNV um 20,8%, und der Fußgänger*innenverkehr um 8% anstieg. Erst mit einem Verbot der Autonutzung (Szenario 5.A), konnte der MIV-Anteil auf null reduziert werden. Das Potential des Umweltverbundes in der Stadt Flensburg, besonders für den Bus, konnte dadurch veranschaulicht werden. Die Veränderung der Mobilität hätte neben dem Absenken der THG-Emissionen auch positive Effekte auf die Raumnutzung, Lebensqualität oder Verkehrssicherheit, da unter anderem der wenig verfügbare Platz in der Stadt anderwärtig genutzt werden kann. Des Weiteren ist festzuhalten, dass das bestehende Modell eine gute Grundlage für weitere Forschung bietet, besonders da hier der nicht-motorisierte Verkehr eine entscheidende Rolle spielt. Hierfür sollten noch weitere Input-Datenerfasst und eingefügt werden, um das Ungleichgewicht im Fahrradverkehr besser auszugleichen. Weitere interessante Bereiche könnten die Resultate bei weiterer Differenzierung des Flensburger Modells sein bieten, wie z.B. durch Segmentierung nach Fahrzweck, das Hinzufügen weiterer Zonen sowie die Analyse zusätzlicher Maßnahmen. Als letztes ist festzuhalten, dass es viele verschiedene Maßnahmen gibt, die den Weg zur nachhaltigen Mobilität möglich machen könnten. Jedoch wird am Beispiel der Stadt Flensburg deutlich, dass die Voraussetzungen zur tatsächlichen Umsetzung der Maßnahmen geschaffen werden müssen, um nachhaltige und dauerhafte Effekte zu erzielen und die Emissionen zu senken.

Literaturverzeichnis

Aktiv Bus Flensburg GmbH (Hrsg.) (2022). Fahrkarten Flensburg. Online verfügbar unter https://aktiv-bus.de/fahrkarten/flensburg/ (abgerufen am 10.03.2022).

Allekotte, Michel; Althaus, Hans-Jörg; Bergk, Fabian; Biemann, Kirsten; Knörr, Wolfram; Sutter, Daniel (2020). Umweltfreundlich mobil! Ein ökologischer Verkehrsartenvergleich für den Personen- und Güterverkehr in Deutschland. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021_fb_umweltfreundlich_mobil_bf.pdf (abgerufen am 20.08.2022).

Arnz, Marlin (2022). marlinarnz/quetzal_germany. Version First release (v1.0.0). Online verfügbar unter https://doi.org/10.5281/zenodo.5886638 (abgerufen am 14.07.2022).

Baur, Mathias Christian (2015). Modellierungsrahmen für Intelligente Verkehrssysteme zur simulationsbasierten Analyse ihrer Wirkungen auf den Straßenverkehr. Technische Universität München. Online verfügbar unter https://mediatum.ub.tum.de/doc/1232484/document.pdf (abgerufen am 25.06.2022).

Ben-Akiva, Moshe; Bierlaire, Michel (1999). Discrete hoice methods and their applications to short term travel decisions. Chapter for the Transportation Science Handbook DRAFT. Online verfügbar unter https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.40.8438&rep=rep1&type=pdf (abgerufen am 28.07.2022).

Brosi, Patrick (2019). GTFS für Deutschland. Online verfügbar unter https://gtfs.de/de/ (abgerufen am 13.07.2022).

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Hrsg.) (2022). Bundesverkehrswegeplan 2030. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Infrastrukturplanung-Investitionen/Bundesverkehrswegeplan-2030/bundesverkehrswegeplan-2030.html (abgerufen am 10.03.2022).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hg.) (2019). Projektionsbericht 2019 für Deutschland. Online verfügbar unter https://www.bmuv.de/download/projektionsbericht-der-bundesregierung-2019 (abgerufen am 20.04.2022).

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022). Abkommen von Paris. Online verfügbar unter

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html (abgerufen am 08.02.2022).

Chasserieau, Quentin; Goix, Robin (2019). Design and use of Quetzal, an open-source Python library for transport modelling. Dublin. 47th European Transport Conference. Online verfügbar unter https://www.systra.com/wp-content/uploads/2020/03/design_and_use_of_quetzal.pdf (abgerufen am 09.06.2022).

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (Hrsg.) (2021a). ANTMOD: Ein agentenbasiertes Modell für den Personenverkehr. Online verfügbar unter https://www.dlr.de/vf/desktopdefault.aspx/tabid-12751/22270_read-72869/ (abgerufen am 29.06.2022).

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (Hrsg.) (2021b). CURRENT: Charging infrastructure for electric vehicles analysis tool. Online verfügbar unter https://www.dlr.de/vf/desktopdefault.aspx/tabid-12751/22270_read-69930/ (abgerufen am 28.06.2022).

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (Hrsg.) (2021c). Institut für Verkehrsforschung. Online verfügbar unter https://www.dlr.de/vf/desktopdefault.aspx/tabid-938/1391_read-6295 (abgerufen am 28.06.2022).

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (Hrsg.) (2021d). TAPAS: Modell für die zukünftige Nachfrage des Personenverkehrs im urbanen Raum. Online verfügbar unter https://www.dlr.de/vf/desktopdefault.aspx/tabid-12751/22270_read-29381/ (abgerufen am 28.06.2022).

Follmer, Robert; Gruschwitz, Dana (2019). Mobilität in Deutschland – MiD Kurzreport. Ausgabe 4.0. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-2017-kurzreport.pdf?__blob=publicationFile (abgerufen am 08.02.2022).

Gottfried EDV, Thomas (2022). Laufende Autokosten berechnen. Online verfügbar unter https://www.rechner.club/auto/laufende-autokosten-berechnen?paramid=9nozl1pifi (abgerufen am 10.03.2022).

IPCC (Hg.) (2022). Summary for Policymakers. [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría,

M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Online verfügbar unter https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf (abgerufen am 24.08.2022).

NDR/ARD-aktuell (Hrsg.) (2022). 52 Millionen 9-Euro-Tickets verkauft. Bilanz der Verkehrsbetriebe. Online verfügbar unter https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/9-euro-ticket-121.html. (abgerufen am 30.08.2022)

Ocker, Florian J. (2020). Entwicklung eines agentenbasierten multimodalen Verkehrsmodells mit MARS. Online verfügbar unter https://mars-group.org/wp-content/uploads/2020/10/MA_Ocker.pdf#cite.Treiber2000 (abgerufen am 28.06.2022).

Ortúzar, Juan de Dios; Willumsen, Luis G. (2011). Modelling Transport. 4th Edition. John Wiley & Sons, Ltd.

Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2022). Generationenvertrag für das Klima. Klimaschutzgesetz 2021. Online verfügbar unter https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672 (abgerufen am 08.02.2022).

Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.) (2021). Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP. Online verfügbar unter https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1990812/04221173eef9a6720059cc353d759a2b/2021-12-10-koav2021-data.pdf?download=1 (abgerufen am 10.03.2022).

PTV Planung Transport Verkehr GmbH (Hrsg.) (2022). Warum sollten Sie Verkehrssimulation verwenden? Online verfügbar unter https://www.myptv.com/de/anwendungsfaelle/verkehrssimulation (abgerufen am 29.06.2022).

Stadt Flensburg (Hg.) (2018). Masterplan Monilität 2030. Maßnahmenkatalog. Online verfügbar unter https://www.flensburg.de/PDF/Flensburg_MaMo_Ma%C3%9Fnahmenkatalog.PDF?ObjSvrID=2306&ObjID=7960&ObjLa=1&Ext=PDF&WTR=1&_ts=1544540869 (abgerufen am 26.04.2022).

Stadt Flensburg (Hg.) (2019). Klimaschutzbericht 2019. Online verfügbar unter https://ratsinfo.flensburg.de/sdnetrim/UGhVM0hpd2NXNFdFcExjZR48Sel1079P

x8bEPbYktjenYfZCBQcJczr0uwwRUlsY/Berichterstattung.pdf (abgerufen am 28.05.2022).

Stadt Flensburg (Hg.) (2020). Sozialatlas 2020. Datenbasis bis 31.12.2019. Online verfügbar unter https://www.flensburg.de/PDF/Sozialatlas_2020.PDF?ObjSvrID=2306&ObjID=11573&ObjLa=1&Ext=PDF&WTR=1&_ts=1620795843 (abgerufen am 14.07.2022).

Stadt Flensburg (Hg.) (2022). Mobilitätsbefragung 2021 Stadt Flensburg. Dortmund. Online verfügbar unter https://www.flensburg.de/PDF/Endbericht_Mobilit%C3%A4tsbefragung_2021.PDF?ObjSvrID=2306&ObjID=13818&ObjLa=1&Ext=PDF&WTR=1&_ts=1652107795 (abgerufen am 25.05.2022).

Statista GmbH (Hrsg.) (2022). Planen Sie ein 9-Euro-Ticket für den Monat August 2022 zu kaufen? Online verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1323665/umfrage/kauf-9-euro-ticket-august/ (abgerufen am 26.08.2022).

Statistisches Bundesamt (Hg.) (2022a). NUTS-Klassifikation. Die Einteilung der Europäischen Union in EU-Regionen. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/Europa/DE/Methoden-Metadaten/Klassifikationen/UebersichtKlassifikationen_NUTS.html (abgerufen am 24.08.2022).

Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2022b). Hauptverursacher von Unfällen mit Personenschaden. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Tabellen/hauptverursacher-fahrzeugart.html (abgerufen am 21.08.2022).

Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2022c). Mobilitätsindikatoren auf Basis von Mobilfunkdaten. Experimentelle Daten. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Service/EXDAT/Datensaetze/mobilitaetsindikatoren-mobilfunkdaten.html;jsessionid=1857D81F4346A0A191AE425F0F06C7A0.live721#allgemeines%20Mobilit%C3%A4tsverhalten (abgerufen am 08.02.2022).

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2022a). Nationale Trendtabellen in der Abgrenzung der Sektoren des Klimaschutzgesetzes (KSG). 1990 - 2020. Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.de/emissionen (abgerufen am 08.02.2022).

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2022b). Verkehr beeinflusst das Klima. Online verfügbar unter

https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/mobilitaet/mobilitaetsdaten/verkehr-treibhausgase (abgerufen am 21.03.2022).

Anhang

A. Auszug der EnSu Mobilitätsumfrage in Flensburg

A.1 Auszug Fragebogen zur Erfassung von Start- und Zielzone

Frage 2:

Denken Sie nun bitte einmal an das letzte Jahr, und zwar an Zeiten, in denen kein Lockdown geherrscht hat. An welchen Tagen der Woche waren Sie da aus den eben genannten Gründen in einer durchschnittlichen Woche unterwegs?							
	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag
Wege zur Arbeit/Arbeitsstätte	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
dienstliche Wege während der Arbeitszeit	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wege zur Ausbildung (z. B. Schule, Uni, Lehre)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wege zum Einkaufen	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wege zu anderen Erledigungen (z. B. Behörden oder Dienstleistungen)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wege zu/bei Freizeitbeschäfti-gungen	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wege bei der Begleitung einer Person (z. B. Kinder)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Filter: Wenn ein Wegzweck angekreuzt wurde, erfolgt die Abfrage der folgenden Blöcke für jeden Zweck separat.

Bitte denken Sie nun an einen typischen Weg zu [*Wegzweck*]. Wenn Ihre Wege mit diesem Zweck im letzten Jahr sehr unterschiedlich waren, denken Sie bitte an den Weg, der am häufigsten vorkam.

Bespiel für den Fahrweck Arbeit:

☐ Arbeit *(aus MiD)* // Weg zur Arbeitsstätte				
A. Wo starten Sie Ihren Weg?				
☐ Altstadt ☐ Neustadt ☐ Nordstadt	☐ Westliche Höhe ☐ Friesischer Berg ☐ Weiche	☐ Südstadt ☐ Sandberg ☐ Jürgensby	☐ Fruerlund ☐ Mürwik ☐ Engelsby	☐ Tarup ☐ Flensburger Umland ☐ Anderes
B. Wo befindet sich Ihr Ziel?				
☐ Altstadt ☐ Neustadt ☐ Nordstadt	☐ Westliche Höhe ☐ Friesischer Berg ☐ Weiche	☐ Südstadt ☐ Sandberg ☐ Jürgensby	☐ Fruerlund ☐ Mürwik ☐ Engelsby	☐ Tarup ☐ Flensburger Umland ☐ Anderes

C. Welche Verkehrsmittel verwenden Sie im Verlauf des Weges? Bitte klicken Sie alle an, egal welchen Anteil am Weg sie haben.		
☐ Zu Fuß (ab ca. 200 m Länge) ☐ E-Fahrrad ☐ Lastenrad ☐ Fahrrad ☐ Moped/ Motorrad	☐ E-Tretroller ☐ Pkw als Fahrer*in ☐ Pkw als Mitfahrer*in ☐ Bus ☐ Straßenbahn	☐ Taxi ☐ Regionalbahn ☐ Fernzug ☐ Fernbus ☐ anderes Verkehrsmittel
D. Welches ist das Verkehrsmittel mit dem größten Streckenanteil?		
☐ Zu Fuß (ab ca. 200 m Länge) ☐ E-Fahrrad ☐ Lastenrad ☐ Fahrrad ☐ Moped/ Motorrad	☐ E-Tretroller ☐ Pkw als Fahrer*in ☐ Pkw als Mitfahrer*in ☐ Bus ☐ Straßenbahn	☐ Taxi ☐ Regionalbahn ☐ Fernzug ☐ Fernbus ☐ anderes Verkehrsmittel
E. Wie viele Wege machen Sie an einem durchschnittlichen Werktag? (Beispiel: 1x Hinweg und 1x Rückweg entspricht 2 Wegen)		

_____Wege			
F. Welche Strecke legen Sie an einem durchschnittlichen Werktag für alle Ihre Arbeitswege zusammen zurück?			
_____km			
G. Wovon ist Ihre Verkehrsmittelwahl abhängig?			
☐ vom Wetter	☐ von meiner verfügbaren Zeit	☐ von der Möglichkeit Dinge zu transportieren	☐ von meiner persönlichen Stimmung
☐ von der Infrastruktur zum/am Zielort (z. B. Wegebeschaffenheit, Parkplatz)	☐ von meinem Gesundheitszustand	☐ von der Dauer meines Aufenthalts	☐ von den (Ticket- / Sprit-) Kosten
☐ davon, wie sicher ich mich auf dem Weg fühle	☐ von der Tageszeit	☐ von meinen persönlichen Überzeugungen	☐ davon, welches Verkehrsmittel man für diesen Weg üblicherweise nutzt
☐ von meinen Gewohnheiten	☐ vom Grund des Weges	☐ von der Nähe des Starts oder Ziels zu einer Sharing Station (Fahrrad/Auto)	☐ von der Länge des Weges zur nächsten Haltestelle, Sharing Station, E-Scooter
☐ von der Verfügbarkeit einer Dauerkarte/eines Abonnements für den ÖPNV	☐ von der Gruppendynamik (falls Du nicht allein unterwegs bist)	☐ davon, ob Kinder dabei sind oder nicht	☐ davon, wo ich mich vor Infektionen sicher fühle

A.2 Ergebnisse von Frage 2

Start der Wege nach Fahrten:

	arbeit.A	dienstreisen.A	ausbildung.A	einkauf.A	erledigungen.A	freizeit.A	begleitung.A
Altstadt	32	8	22.0	37	26	34	10
Engelsby	22	6	7.0	29	15	19	10
Friesischer Berg	13	2	6.0	21	17	13	6
Fruerlund	30	3	3.0	37	24	34	5
Jürgensby	45	4	30.0	62	38	56	8
Mürwik	40	4	6.0	42	25	37	14
Neustadt	19	7	9.0	20	6	15	7
Nordstadt	26	6	6.0	33	15	26	11
Sandberg	33	11	32.0	47	33	41	6
Südstadt	12	6	12.0	23	11	16	5
Tarup	22	4	5.0	24	14	20	12
Weiche	23	3	4.0	27	14	23	14
Westliche Höhe	29	5	8.0	32	13	22	8
Flensburger Umland	6	10	NaN	4	2	7	2
woanders	4	19	9.0	5	6	11	5

Ziel der Wege nach Fahrten:

	arbeit.B	dienstreisen.B	ausbildung.B	einkauf.B	erledigungen.B	freizeit.B	begleitung.B
Altstadt	44	8.0	2.0	53	87	28	8
Engelsby	8	1.0	4.0	67	11	12	7
Friesischer Berg	9	3.0	4.0	29	18	10	2
Fruerlund	3	NaN	1.0	20	9	4	5
Jürgensby	5	3.0	4.0	24	7	10	3
Mürwik	24	5.0	2.0	44	32	21	14
Neustadt	13	2.0	1.0	34	10	3	5
Nordstadt	23	5.0	6.0	20	9	18	7
Sandberg	50	6.0	100.0	27	3	20	4
Südstadt	34	2.0	5.0	28	11	6	4
Tarup	3	NaN	1.0	13	2	2	4
Weiche	15	2.0	NaN	24	2	7	4
Westliche Höhe	15	2.0	7.0	24	16	22	8
Flensburger Umland	33	17.0	2.0	21	14	118	27
woanders	77	42.0	20.0	15	28	93	21

B. Eingesetzte Modellparameter

B.1 Szenario 2: Umweltverbund

Maximierung/Minimierung	cycling_speed [m/s]	ticket_price [€/Weg]
±10%	3,9722222222222	1,6875
±20%	4,3333333333333	1,5000
±30%	4,6944444444444	1,3125
±40%	5,0555555555556	1,1250
±50%	5,4166666666667	0,9375
±60%	5,7777777777778	0,7500
±70%	6,1388888888889	0,5625
±80%	6,5000000000000	0,3750
±90%	6,8611111111111	0,1875
±100%	7,2222222222222	0,0000

B.2 Szenario 3: Autovermeidung

Maximierung	Price [€/km]
±10%	0,143
±20%	0,156
±30%	0,169
±40%	0,182
±50%	0,195
±60%	0,208
±70%	0,221
±80%	0,234
±90%	0,247
±100%	0,260

C. Modellergebnisse

C.1 Modellergebnisse Szenario 1: 9€-Ticket

Modal Split [%]	Segment ‚Autobesitz‘		Segment ‚Ticketbesitz‘	
	car_owner	pt_captive	ticket_owner	noticket
Fahrten				
MIV	49,0	0	10,4	26,4
Fahrrad	15,0	14,4	12,5	36,7
zu Fuß	28,9	39,3	17,4	35,2
Bus	7,0	46,3	59,6	1,8
Passenger km				
MIV	65,8	0	2,0	22,6
Fahrrad	7,3	3,4	2,9	48,3
zu Fuß	23,0	22,5	4,2	28,8
Bus	4,0	74,1	91	0,3

C.2 Modellergebnisse Szenario 2: Umweltverbund

Szenario 2.A: Maximierung der Fahrradgeschwindigkeit

Modal Split [%]	+10%		+20%		+30%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	48,9	0,0	48,9	0,0	48,8	0,0
Fahrrad	15,2	14,5	15,3	14,5	15,4	14,6
zu Fuß	28,9	39,2	28,9	39,1	28,8	39,1
Bus	7,0	46,3	7,0	46,3	7,0	46,3
Personenkilometer						
MIV	65,7	0,0	65,6	0,0	65,5	0,0
Fahrrad	7,5	3,4	7,6	3,4	7,8	3,4
zu Fuß	22,9	22,5	22,9	22,4	22,8	22,3
Bus	3,9	74,2	3,9	74,2	3,9	74,2

	+40%		+50%		+60%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	48,8	0,0	48,7	0,0	48,7	0,0
Fahrrad	15,5	14,6	15,5	14,7	15,6	14,7
zu Fuß	28,8	39,1	28,8	39,0	28,8	39,0
Bus	6,9	46,3	6,9	46,3	6,9	46,3
Personenkilometer						
MIV	65,4	0,0	65,3	0,0	65,3	0,0
Fahrrad	7,9	3,4	8,0	3,5	8,1	3,5
zu Fuß	22,8	22,3	22,8	22,2	22,8	22,2
Bus	3,9	74,2	3,9	74,2	3,9	74,2

	+70%		+80%		+90%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	48,7	0,0	48,7	0,0	48,6	0,0
Fahrrad	15,7	14,8	15,7	14,8	15,7	14,8
zu Fuß	28,7	39,0	28,7	38,9	28,7	38,9
Bus	6,9	46,3	6,9	46,3	6,9	46,3
Personenkilometer						
MIV	65,2	0,0	65,2	0,0	65,1	0,0
Fahrrad	8,1	3,5	8,2	3,6	8,3	3,7
zu Fuß	22,7	22,2	22,7	22,1	22,7	22,1
Bus	3,9	74,3	3,9	74,2	3,9	74,2

	+100%	
	car_owner	pt_captive
Fahrten		
MIV	48,6	0,0
Fahrrad	15,8	14,8
zu Fuß	28,7	38,9
Bus	6,9	46,3
Personenkilometer		
MIV	65,1	0,0
Fahrrad	8,4	3,7
zu Fuß	22,7	22,1
Bus	3,9	74,3

Szenario 2.B: Minimierung des Buspreises

Modal Split [%]	-10%		-20%		-30%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	48,0	0,0	46,9	0,0	45,7	0,0
Fahrrad	14,7	14,1	14,3	13,8	13,9	13,5
zu Fuß	29,1	39,3	29,2	39,4	29,3	39,5
Bus	8,2	46,6	9,5	46,8	11,0	47,0
Personenkilometer						
MIV	64,1	0,0	61,9	0,0	59,2	0,0
Fahrrad	7,0	3,2	6,7	3,1	6,4	3,0
zu Fuß	23,4	22,6	23,7	22,7	24,1	22,8
Bus	5,5	74,2	7,6	74,2	10,3	74,2

	-40%		-50%		-60%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	44,3	0,0	42,6	0,0	41,0	0,0
Fahrrad	13,5	1,3	13,4	13,2	12,8	13,0
zu Fuß	29,6	39,5	29,7	39,4	30,0	39,5
Bus	12,7	47,2	14,4	47,4	16,2	47,5
Personenkilometer						
MIV	56,0	0,0	51,8	0,0	47,4	0,0
Fahrrad	5,9	2,9	6,0	2,9	5,4	2,8
zu Fuß	24,3	23,0	24,4	22,9	24,4	23,0
Bus	13,8	74,1	17,8	74,2	22,7	74,2

	-70%		-80%		-90%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	39,9	0,0	37,4	0,0	35,4	0,0
Fahrrad	11,8	12,4	11,1	12,1	10,5	11,8
zu Fuß	30,5	39,9	31,0	40,1	31,5	40,2
Bus	18,4	47,7	20,4	47,8	22,5	47,9
Personenkilometer						
MIV	42,7	0,0	37,5	0,0	32,4	0,0
Fahrrad	4,3	2,5	3,7	2,4	3,1	2,3
zu Fuß	24,5	23,6	24,3	23,8	24,0	24,0
Bus	28,5	73,9	34,4	73,8	40,4	73,7

	-100%	
	car_owner	pt_captive
Fahrten		
MIV	33,3	0,0
Fahrrad	9,8	11,5
zu Fuß	32,2	40,4
Bus	24,6	48,1
Personenkilometer		
MIV	27,4	0,0
Fahrrad	2,6	2,2
zu Fuß	23,8	24,3
Bus	46,2	73,5

Szenario 2.Mix: Kombination aus 2.A und 2.B

Modal Split [%]	±10%		±20%		±30%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	48,0	0,0	46,8	0,0	45,6	0,0
Fahrrad	14,8	14,2	14,6	14,0	14,2	13,7
zu Fuß	29,0	39,3	29,1	39,3	29,2	39,3
Bus	8,2	46,6	9,5	46,8	11,0	47,0
Personenkilometer						
MIV	64,0	0,0	61,8	0,0	59,0	0,0
Fahrrad	7,2	3,3	7,0	3,2	6,8	3,1
zu Fuß	23,3	22,5	23,6	22,6	23,9	22,6
Bus	5,5	74,2	7,6	74,3	10,2	74,3

	±40%		±50%		±60%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	44,2	0,0	42,6	0,0	41,0	0,0
Fahrrad	13,8	13,5	13,4	13,2	12,8	13,0
zu Fuß	29,4	39,3	29,7	39,4	30,0	39,5
Bus	12,6	47,2	14,4	47,4	16,2	47,5
Personenkilometer						
MIV	55,7	0,0	51,8	0,0	47,4	0,0
Fahrrad	6,4	3,0	6,0	2,9	5,4	2,8
zu Fuß	24,2	22,7	24,4	22,9	24,4	23,0
Bus	13,6	74,3	17,8	74,2	22,7	74,2

	±70%		±80%		±90%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	39,2	0,0	37,3	0,0	35,3	0,0
Fahrrad	12,3	12,7	11,6	12,4	11,0	12,2
zu Fuß	30,3	39,6	30,8	39,8	31,4	39,9
Bus	18,2	47,7	20,3	47,8	22,4	47,9
Personenkilometer						
MIV	42,5	0,0	37,4	0,0	32,2	0,0
Fahrrad	4,8	2,7	4,2	2,6	3,6	2,5
zu Fuß	24,4	23,2	24,2	23,4	23,9	23,6
Bus	28,3	74,1	34,2	74,0	40,2	73,9

	±100%	
	car_owner	pt_captive
Fahrten		
MIV	33,2	0,0
Fahrrad	10,3	11,9
zu Fuß	32,1	40,1
Bus	24,5	48,1
Personenkilometer		
MIV	27,4	0,0
Fahrrad	3,0	2,4
zu Fuß	23,7	23,8
Bus	45,9	73,8

C.3 Modellergebnisse Szenario 3: Autovermeidung

Modal Split [%]	-10%		-20%		-30%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	47,7	0,0	46,4	0,0	45,2	0,0
Fahrrad	15,4	14,4	15,8	14,4	16,2	14,4
zu Fuß	29,7	39,3	30,3	39,3	31,0	39,3
Bus	7,2	46,3	7,4	46,3	7,6	46,3
Personenkilometer						
MIV	62,9	0,0	60,1	0,0	57,1	0,0
Fahrrad	7,9	3,4	8,5	3,4	9,2	3,4
zu Fuß	24,9	22,5	26,8	22,5	28,7	22,5
Bus	4,3	74,1	4,7	74,1	5,0	74,1

	-40%		-50%		-60%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	43,9	0,0	42,7	0,0	41,5	0,0
Fahrrad	16,5	14,4	16,9	14,4	17,3	14,4
zu Fuß	31,7	39,3	32,4	39,3	33,0	39,3
Bus	7,8	46,3	8,0	46,3	8,2	46,3
Personenkilometer						
MIV	54,2	0,0	51,3	0,0	48,4	0,0
Fahrrad	9,8	3,4	10,4	3,4	11,0	3,4
zu Fuß	30,6	22,5	32,5	22,5	34,4	22,5
Bus	5,4	74,1	5,8	74,1	6,1	74,1

	-70%		-80%		-90%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	40,3	0,0	39,1	0,0	38,0	0,0
Fahrrad	17,6	14,4	17,9	14,4	18,3	14,4
zu Fuß	33,7	39,3	34,3	39,3	35,0	39,3
Bus	8,4	46,3	8,6	46,3	8,7	46,3
Personenkilometer						
MIV	45,6	0,0	42,9	0,0	40,3	0,0
Fahrrad	11,6	3,4	12,2	3,4	12,8	3,4
zu Fuß	36,6	22,5	38,1	22,5	39,8	22,5
Bus	6,5	74,1	6,8	74,1	7,1	74,1

	-100%	
	car_owner	pt_captive
Fahrten		
MIV	36,9	0,0
Fahrrad	18,6	14,4
zu Fuß	35,6	39,3
Bus	8,9	46,3
Personenkilometer		
MIV	37,7	0,0
Fahrrad	13,4	3,4
zu Fuß	41,5	22,5
Bus	7,4	74,1

C.4 Modellergebnisse Szenario 4: Autofrei

Modal Split [%]	**Autofreie Norderstraße/ Rathausstra0e**		**Autofreie Innenstadt**		**Autofreier Tag**	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	49,0	0,0	48,0	0,0	0,0	0,0
Fahrrad	15,1	14,4	15,3	14,3	29,7	14,4
zu Fuß	29,0	39,3	29,5	39,3	58,1	39,3
Bus	7,0	46,3	7,2	46,4	12,2	46,3
Personenkilometer						
MIV	65,7	0,0	64,5	0,0	0,0	0,0
Fahrrad	7,3	3,3	7,5	3,1	20,9	3,4
zu Fuß	23,0	22,2	23,6	21,3	69,3	22,5
Bus	4,0	74,5	4,4	75,6	9,7	74,1

C.5 Modellergebnisse Szenario 5: Kombination

Nachfragesegment ‚Autobesitz'

Modal Split [%]	±10%		±20%		±30%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	46,7	0,0	44,3	0,0	41,8	0,0
Fahrrad	15,2	14,2	15,3	14,0	15,2	13,7
zu Fuß	29,7	39,3	30,4	39,3	31,2	39,3
Bus	8,4	46,6	10,0	46,8	11,8	47,0
Personenkilometer						
MIV	61,0	0,0	55,8	0,0	50,2	0,0
Fahrrad	7,8	3,2	8,1	3,1	8,3	3,1
zu Fuß	25,1	22,2	27,1	22,2	28,8	22,3
Bus	6,1	74,6	8,9	74,7	12,7	74,7

	±40%		±50%		±60%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	38,2	0,0	35,7	0,0	33,2	0,0
Fahrrad	15,2	13,4	14,9	13,2	14,5	12,9
zu Fuß	32,4	39,4	33,1	39,5	33,8	39,6
Bus	14,2	47,2	16,3	47,4	18,6	47,5
Personenkilometer						
MIV	42,1	0,0	35,9	0,0	29,9	0,0
Fahrrad	8,2	2,8	7,7	2,7	7,0	2,6
zu Fuß	30,6	21,5	31,2	21,6	31,2	21,8
Bus	19,1	75,7	25,2	75,7	31,9	75,6

	±70%		±80%		±90%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	30,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fahrrad	13,9	12,6	19,6	12,4	18,1	12,2
zu Fuß	34,4	39,7	53,5	39,8	53,4	39,9
Bus	21,0	47,7	26,8	47,8	28,5	47,9
Personenkilometer						
MIV	24,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fahrrad	6,1	2,5	7,8	2,6	6,4	2,5
zu Fuß	30,7	21,9	50,0	23,4	47,9	23,6
Bus	38,8	75,6	42,2	74,0	45,6	73,9

	±100%	
	car_owner	pt_captive
Fahrten		
MIV	0,0	0,0
Fahrrad	16,6	11,9
zu Fuß	53,4	40,1
Bus	30,0	48,0
Personenkilometer		
MIV	0,0	0,0
Fahrrad	5,2	2,4
zu Fuß	46,3	23,8
Bus	48,5	73,8

Wiederholung der Simulation ±80% - ±100% ohne den autofreien Tag:

	±80%		±90%		±100%	
	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive	car_owner	pt_captive
Fahrten						
MIV	28,2	0,0	25,9	0,0	23,6	0,0
Fahrrad	13,3	12,4	12,5	12,1	11,8	11,8
zu Fuß	35,2	39,8	35,9	40,0	36,8	40,1
Bus	23,3	47,8	25,6	47,9	27,8	48,1
Personenkilometer						
MIV	19,6	0,0	15,5	0,0	12,2	0,0
Fahrrad	5,2	2,4	4,3	2,3	3,5	2,2
zu Fuß	29,8	22,1	28,9	22,3	28,0	22,5
Bus	45,3	75,5	51,3	75,4	56,3	75,2

Nachfragesegment ‚Ticketbesitz'

Modal Split [%]	±10%		±20%		±30%	
	ticket_owner	noticket	ticket_owner	noticket	ticket_owner	noticket
Fahrten						
MIV	10,0	24,5	9,6	22,9	9,2	21,4
Fahrrad	12,8	38,0	13,0	39,1	13,1	39,8
zu Fuß	17,7	35,3	17,9	35,5	18,3	35,9
Bus	59,6	2,1	59,5	2,5	59,3	2,9
Personenkilometer						
MIV	1,8	18,8	1,6	15,8	1,5	13,2
Fahrrad	3,0	52,3	3,1	55,3	3,2	57,6
zu Fuß	4,2	28,5	4,4	28,4	4,5	28,4
Bus	91,1	0,4	90,9	0,5	90,7	0,7

	±40%		±50%		±60%	
	ticket_owner	noticket	ticket_owner	noticket	ticket_owner	noticket
Fahrten						
MIV	8,6	18,9	8,3	17,6	7,9	16,3
Fahrrad	13,2	40,6	13,2	40,7	13,2	40,6
zu Fuß	19,1	37,0	19,6	37,5	20,2	38,2
Bus	59,1	3,6	58,9	4,2	58,7	4,9
Personenkilometer						
MIV	1,2	10,1	1,1	8,5	1,0	7,2
Fahrrad	3,2	59,5	3,2	60,0	3,2	59,9
zu Fuß	4,7	29,3	5,0	29,9	5,4	30,8
Bus	90,9	1,1	90,7	1,5	90,4	2,1

	±70%		±80%		±90%	
	ticket_owner	noticket	ticket_owner	noticket	ticket_owner	noticket
Fahrten						
MIV	7,5	15,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Fahrrad	13,1	40,2	16,4	45,9	15,9	44,3
zu Fuß	21,0	39,0	27,1	46,9	27,9	47,6
Bus	58,5	5,7	56,5	7,1	56,2	8,1
Personenkilometer						
MIV	0,9	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Fahrrad	3,2	59,1	5,4	59,2	5,2	56,5
zu Fuß	5,8	32,0	10,4	37,6	11,1	39,2
Bus	90,1	2,8	84,1	3,3	83,7	4,3

	±100%	
	ticket_owner	noticket
Fahrten		
MIV	0,0	0,0
Fahrrad	15,3	42,5
zu Fuß	28,7	48,3
Bus	55,9	9,2
Personenkilometer		
MIV	0,0	0,0
Fahrrad	4,9	53,2
zu Fuß	11,9	41,2
Bus	83,3	5,6

	±80%		±90%		±100%	
	ticket_owner	noticket	ticket_owner	noticket	ticket_owner	noticket
Fahrten						
MIV	7,1	13,9	6,7	12,8	6,3	11,7
Fahrrad	12,9	39,6	12,7	38,7	12,4	37,6
zu Fuß	21,8	39,9	22,7	41,0	23,8	42,1
Bus	58,2	6,6	57,9	7,6	57,6	8,6
Personenkilometer						
MIV	0,8	5,1	0,7	4,3	0,0	3,5
Fahrrad	3,2	57,7	3,2	55,5	3,1	52,7
zu Fuß	6,3	33,5	6,9	35,3	7,7	37,4
Bus	89,6	3,7	89,2	4,9	88,6	6,4