

## **BAST Projekt FE 18.0026/2017**

### **Entlastung des Bundesfernstraßennetzes durch multimodale Angebote im Personenverkehr**

(Entlastung des Bundesfernstraßennetzes durch  
multimodale Personenverkehr)

### **Relieving congestion on the federal highway network through multimodal passenger travel**

(Relieving congestion on the federal highway network  
through multimodal travel)

Prof. Dr. Rolf Moeckel, Dr. Ana Tsui Moreno, Dr. Carlos Llorca, Wei-Chieh  
Huang, Alona Pukhova  
Technische Universität München, Professur für Verkehrshalten

Prof. Dr. Klaus Bogenberger, Dr. Sabine Krause, Yunfei Zhang, Florian  
Dandl, Sasan Amini  
Technische Universität München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik

Eingereicht am 0831.0712.20224

## Kurzfassung

Die strategischen Ziele des Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2030 beinhalten die Reduktion von Staus auf den Bundesfernstraßen sowie die Erhöhung der Kapazität im Personen- und Güterverkehr auf der Schiene. Hinzu kommt, dass der BVWP und die Nationale Plattform Zukunft der Mobilität unter anderem das Ziel eines „weitgehend treibhausgasneutralen und umweltfreundlichen Verkehrssystems“ formulieren. Um diese Ziele erreichen zu können, sollen Fahrten des motorisierten Individualverkehrs auf nachhaltigere Verkehrsmittel verlagert werden, die dazu führen, dass Verkehrsemissionen reduziert werden.

Ziel dieses Projektes ist es, multimodale Angebote im Personenfernverkehr zu identifizieren, die die Bundesfernstraßen entlasten könnten und deren Potential hinsichtlich der strategischen verkehrlichen und umweltpolitischen Ziele der Bundesregierung zu bewerten. Sieben Strategien zur Reduktion der Fernfahrten mit Privatfahrzeugen wurden untersucht: (1) Verbesserung der lokalen Anbindung an die Bahn, (2) Verbesserung des Fernbusservices, (3) Deutschlandtakt im Bahnverkehr, (4) Einführung einer Maut, (5) Kombination der ÖV-Strategien (1+2+3), (6) Kombination der ÖV-Strategien und der Maut (1+2+3+4) und (7) erhöhte PKW-Betriebskosten. Die Bewertungsmetriken beinhalten verkehrliche, umweltbezogene und soziale Indikatoren.

Da die Maßnahmen noch nicht realisiert sind, wurden Verkehrssimulationen verwendet um den Effekt der verschiedenen Strategien abzuschätzen. In diesem Ansatz wurden zwei Modelle verwendet: ein agentenbasiertes Modell und ein aggregiertes Modell. Für dieses Projekt wurde eine synthetische Bevölkerung für das Jahr 2030 generiert. Für jeden Agenten wurde die Nachfrage für Fernfahrten mit dem neu entwickelten Modell ALDITO simuliert. Die Schätzung und Kalibrierung des Modells erfolgte auf Basis von Daten der Haushaltsbefragung Mobilität in Deutschland (2017). Die Fahrten wurden im agentenbasierten Modell mit MATSim und im aggregierten Modell mit SUMO auf das Netz umgelegt.

Die ~~Anwendung dieser Methoden Ergebnisse~~ vermitteln ein besseres Verständnis für das Potenzial von Strategien und Maßnahmen zur Reduktion von Verkehrsemissionen und Verbesserung der Servicequalität des Bundesfernstraßennetzes bei gleichzeitiger Minimierung der sozialen Wirkungen. ~~Die Kombination von „push“ und „pull“ Maßnahmen führen zu den besten Ergebnissen. Die Einführung einer Maut reduziert den PKW-Verkehr auf den Bundesfernstraßen an effektivsten, verlagern aber die Verkehrs- und Stau Probleme auf das untergeordnete Netz. Wird diese Maßnahme mit den ÖV-Strategien kombiniert, können die meisten negativen Effekte der Einführung~~

~~einer Maut, beispielsweise die leichte Erhöhung der verkehrlichen Emissionen und die größere Ungleichheit zwischen Haushalten mit höherem und niedrigerem sozioökonomischen Status, ausgeglichen werden. In ähnlicher Weise führten höhere Betriebskosten zu einem geringeren Pkw-Verkehr und geringeren Gesamtemissionen, jedoch zu sehr hohen Kosten und großen Abweichungen zwischen den sozioökonomischen Statusgruppen. Trotzdem kommen die Ergebnisse nicht in die Nähe der Zielwerte, auch nicht bei dem Szenario mit erhöhten Betriebskosten der Fahrzeuge. Es gibt weiterhin Potenzial zur Reduktion der Emissionslevel durch andere Maßnahmen im Fernverkehr, wie beispielsweise der Reduktion des Flugverkehrs oder höheren Kosten für die Nutzung des von Fahrzeugen, die auch mit Maßnahmen im Nahverkehr kombiniert werden sollten, um das Ziel des weitgehend treibhausgasneutralen Verkehrssystems zu erreichen.~~

## Abstract

The Federal Transport Infrastructure Plan (BVWP) 2030 has specific goals to include reducing congestion on the federal highway network and increasing passenger and freight rail capacity. At the same time, the Federal Transport Infrastructure Plan and the National Platform for the Future of Mobility formulate, among other things, the future goal of a "largely greenhouse gas-neutral and environmentally friendly transport system". In order to meet both goals, motorized private vehicle trips shall be shifted to more sustainable modes, which would in the end reduce transport emissions.

The objective of this project is to identify multimodal options of long-distance passenger travel in order to relieve the federal highway network and evaluate their potential to meet the Federal Government's transport and environmental policy goals. Seven strategies to reduce individual private vehicle long-distance trips were tested: (1) improvement of access/egress to long-distance rail, (2) improvement on the long-distance bus service, (3) Deutschland-Takt (nationwide integrated regular interval timetable), (4) implementation of tolls, (5) combination of "pull" (transit) strategies (1+2+3), (6) combination of "push" and "pull" (toll) strategies (1+2+3+4) and (7) increase auto operating costs. The evaluation of the measures included transport, environmental and social indicators.

Given that the measures are not yet implemented; traffic simulations were used to estimate the effect of the strategies. The approach used two models: an agent-based model and an aggregated model. For this project, we generated the synthetic population of Germany for the year 2030. For each agent, long-distance travel demand was simulated using a newly developed travel demand model ALD<sub>TO</sub> (Agent-based Long-Distance-distance Transport Orchestrator). The model was estimated and calibrated using the German Household Travel Survey (Mobilität in Deutschland, 2017). The trip lists were assigned to the network using MATSim, for the agent-based approach, and SUMO, for the aggregated approach.

The application of this methodological framework can provide a better understanding of the potential of strategies to reduce transport emissions and improve the service quality of the Federal Highway Network, while minimizing social impacts.

~~The results provide a better understanding of potential strategies and policies to reduce transport emissions and improve the quality of service on the Federal Highway Network, while minimizing social impacts. The combination of "push" and "pull" strategies provided the best results. Applying tolls to the federal highway network reduced more effectively the share of private vehicles but shifted~~

traffic and congestion problems to the local network. Combining this measure with all transit improvements mitigated the most negative impacts of tolls, such as slight increase on transport emissions and higher inequality between high and low socioeconomic status households. Similarly, increased auto operating costs produced a reduction on the number of auto trips and overall emissions, but it resulted in very large costs and high differences among socioeconomic status groups. However, the results were not close to the targets even after increasing substantially vehicle operating costs. There is still potential for further reductions in emission levels through other long-distance measures, such as restrictions on air travel or higher vehicle operating costs, which should be also combined with short-distance measures to achieve the overall goal of a largely greenhouse gas neutral transport system.

## englischer Kurzbericht

The Federal Transport Infrastructure Plan (BVWP) 2030 has specific goals to include reducing congestion on the federal highway network and increasing passenger and freight rail capacity. At the same time, the Federal Transport Infrastructure Plan and the National Platform for the Future of Mobility formulate, among other things, the future goal of a "largely greenhouse gas-neutral and environmentally friendly transport system". In order to meet both goals, motorized private vehicle trips shall be shifted to more sustainable modes, which would in the end reduce transport emissions.

The objective of this project is to identify multimodal options of long-distance passenger travel in order to relieve the federal highway network and evaluate their potential to meet the Federal Government's transport and environmental policy goals.

Given that the measures are not yet implemented; traffic simulations were used to estimate the effect of the strategies. The approach used two models: an agent-based model and an aggregated model in order to combine the efficiency of an aggregate model with the level of detail of an agent-based model. For this project, we generated the synthetic population of Germany for the year 2030. For each agent, long-distance travel demand was simulated using a newly developed travel demand model ALTO (Agent-based Long-~~Distance~~-~~distance~~ Transport Orchestrator). The model was estimated and calibrated using data from the household survey Mobility in Germany (2017). The analysis focuses on long-distance traffic, which accounts for the largest share of traffic on the federal road network. Nevertheless, we added short-distance traffic and freight traffic to capture the total traffic volume. Trips were assigned to the network using MATSim, for the agent-based approach, and SUMO, for the aggregated approach. The study area covers all Germany and its surrounding areas and includes all modes of transportation.

Seven strategies to reduce individual private vehicle long-distance trips were tested:

1. Improvement of access/egress to long-distance rail. In this approach, we assumed that access to/from long-distance or regional trains is carried out with ridepooling services that use the road network, instead of accessing by transit. Trips were not coordinated. Home pickup could add to the appeal of rail in areas with sparse or undeveloped public transit systems. Price rates were selected based on existing taxi and on-demand services.

2. Improvement of long-distance bus service. In this scenario, we tested the effect of adjusting the tax rate for long-distance bus travel from 19% to 7%. In addition, a general improvement of the routes with poorer service is assumed rather than improving/adding single routes. Specifically, we

put the poor service routes on a level with the good service routes by improving their commercial speed.

3. Deutschland-Takt (nationwide integrated regular interval timetable). The "Deutschland-Takt" proposes measures to ensure that the overall rail network becomes much more attractive for long-distance traffic. For passengers, this means shorter travel times, fewer transfer times, and improved service on main axes by shortening intervals. In the different variants of the scenario, travel time reductions of 10%, 30% and 50% were selected. The transfer times were also reduced 5 or 10 minutes for all routes. For testing purposes, we included an unfeasible extreme Deutschland-Takt scenario, which implied doubling commercial speed.

4. Implementation of tolls. In this scenario, we implemented a distance-based toll for passenger cars, as a measure to decrease the attractiveness of auto ("push"). In the variants, we tested different rates per kilometer and also different roads to be implemented at: only on freeways or in all roads of the federal network. The shift potential to other modes of transport and other roads is examined.

5. Combination of public transport strategies (1+2+3). In this combination scenario we combine all measures to increase the attractiveness of public transport ("pull"). The measures affect long-distance rail by increasing commercial speed of all routes and reducing transfer times and by considering ridepooling access/egress to main train stations. For long-distance bus, we included improvement in the network and price reductions due to the change in VAT.

6. Combination of public transport strategies and tolling (1+2+3+4). Finally, this scenario combines the measures from scenarios 1, 2, 3 and 4. In this way, synergy effects between push and pull measures could be evaluated. While passenger car is made more expensive, a significant improvement is introduced in public transport.

7. Increased car operating costs. In this scenario, the cost of driving a private motorized vehicle is increased, sometimes dramatically, while the prices of all other modes of transportation remain constant.

To evaluate the impacts of such strategies, we defined a set of indicators. Specifically, we have selected transportation-related indicators; environment-related indicators; and social mobility indicators. They include multimodal accessibility, modal share, traffic volumes and congestion degree, CO<sub>2</sub>-equivalent emissions, and travel cost/income ratio, among others.

As for the results, we could observe that long-distance rail measures increased accessibility in all area types. Deutschland-Takt improves all area types equally. To improve the accessibility of the least accessible areas, ridepooling as an access or departure mode was more effective. However, the rail accessibility was still lower than auto accessibility, except for car users that avoid tolls in the toll scenario. In that scenario, accessibility for car users paying tolls is still significantly higher than rail users.

Unlike accessibility, which describes potential demand, the modal split relates directly to the demand. In all scenarios, private vehicle remains a dominant mode of transport. Scenario 7 showed the strongest change in modal split, with an auto share equal to 70 %, which is 13 percentage points less than in the baseline scenario. A decrease in rail travel of 0.4% is only observed in scenario 2, where bus connections have been improved and the cost of a bus ticket has been reduced. This scenario produces the most significant increase in bus share, which is equal to 1.9% percent points. The introduction of road tolls does not lead to a modal shift to other modes, as road traffic is merely shifted from certain types of roads to others. The increase in the shares of rail and bus in scenarios 5 and 6 is comparable to the increase in scenarios 2 and 1. Scenario 7, as mentioned earlier, shows the most significant change in the modal split.

As for the effects on the vehicle-km travelled (VKT), the most significant reduction on freeways is achieved by increasing auto operating costs. This reduction is also observed on the other roadways. The toll scenario also produced significant variations on VKT. Adding tolls to freeways reduced significantly VKT, although we observe a higher increase of VKT on federal highways and other roads, indicating that auto drivers re-route to toll-free roads but do not shift to other modes. Pull measures produce slight decrease on auto VKT.

Looking at congestion, the highest degrees are on freeways, followed by federal highways and other roads. Tolls and increased auto operating cost are the scenarios that cause the largest changes in congestion, measured as the volume to capacity ratio in the peak hour. The increased VKT in federal highways and other roads caused by tolls resulted in a slight increase in congestion. For the other strategies, the reduction in congestion is much smaller. In fact, adding ridepooling services as access/egress to long-distance rail increased slightly congestion due to the additional ridepooling trips.

In terms of CO<sub>2</sub> equivalent emissions, they were calculated for across all modes. As for the previous indicators, the strongest reduction is achieved after increasing operating costs, while the strongest increase can be observed in the toll scenarios. Cars are the main emission contributor in all

scenarios, accounting for 71% to 75% of the total daily emissions of all long-distance modes, except in Scenario 7, where emissions were 53% of the total. Even though air travel represents a small share of all trips, its emissions are between 22% and 24% of total emissions in Scenarios 1 through 6, and 35% in scenario 7. For that scenario, the higher modal split share of long-distance bus and train increased their CO<sub>2</sub>-equivalent emissions share to 2–6% of the total share. As a result, the total CO<sub>2</sub>-equivalent emissions are reduced by 20% compared to the base scenario.

The application of this methodological framework can provide a better understanding of the potential of strategies to reduce transport emissions and improve the service quality of the Federal Highway Network, while minimizing social impacts. The combination of "push" and "pull" strategies provided the best results. Applying tolls to the federal highway network reduced more effectively the share of private vehicles but shifted traffic and congestion problems to the local network. Combining this measure with all transit improvements mitigated the most negative impacts of tolls, such as slight increase on transport emissions and higher inequality between high- and low-socioeconomic status households. Similarly, increased auto operating costs produced a reduction on the number of auto trips and overall emissions, but it resulted in very large costs and high differences among socioeconomic status groups. However, the results were not close to the targets even after increasing substantially vehicle operating costs. There is still potential for further reductions in emission levels through other long-distance measures, such as restrictions on air travel or higher vehicle operating costs, which should be also combined with short-distance measures to achieve the overall goal of a largely greenhouse gas neutral transport system.

In summary, the following recommendations can be derived from this project:

–The Deutschland-Takt is a good strategy to make travel by rail more comfortable. However, its impact on private motorized travel is marginal because the total travel time is slightly reduced in most routes. Less than 1.5 percent points auto travelers are shifted to long-distance rail.

–If rail travel times could be cut in half in an extreme implementation of Deutschland-Takt, the number of rail trips would double and long-distance car travel would fall by almost 9 percent points.

–Implementing tolls would relieve congestion on freeways and highways, but would also lead to a shift of traffic to non-tolled roads. The modal shift from private cars to long-distance bus and rail after implementing tolls hardly takes place. With a toll of 5 cents/km on freeways and highways, the private-car share of all long-distance trips is reduced from 77.6% to 76.0%.

–Charges per kilometer traveled effectively shift travel demand from private cars to other modes of transportation. At low rates (20 cents per kilometer traveled), only 3.8 percent points are shifted

from cars to other long-distance modes. At very high rates (€2 per kilometer traveled), the car share on long-distance trips is reduced by 43 percent points and drops to only 35% of the modal split. However, the social impacts of such massive increases in car prices have not been studied, especially in rural areas where alternative travel options are often limited.

–Long-distance passenger travel currently accounts for 17% of CO2 emissions on Germany's roads. Short-distance passenger travel contributes 27% and freight transport 56% of CO2 emissions from road transport. All three sectors must contribute with combined strategies to reduce transport emissions.

In addition to these briefly summarized recommendations, other important conclusions and detail explanation of the recommendations are included on the full report.

Formatiert: Allgemeine Daten

## Danksagung

Dr. Bastian Chlond (KIT), Wulf Hahn (RegioConsult), Dr. Kay Plötner (Bauhaus Luftfahrt) und Prof. Dr. Dirk Zumkeller haben den Begleitkreis zu diesem Projekt gebildet und standen für die gesamte Projektdauer beratend zur Seite. Die konstruktiven Hinweise aus dem Begleitkreis sind in die Berichte eingeflossen und haben wesentlich zur Qualitätskontrolle beigetragen. Dr. Lutz Rittershaus und Peter Lubrich von der BASt haben das Projekt professionell für das Ministerium betreut und das Team an der Technischen Universität München in jeder Hinsicht unterstützt. Peter Schmitz hat uns vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur begleitet. Herr Schmitz hat dem Autorenteam die Freiheit gelassen, das Projekt kreativ zu entwickeln, während er gleichzeitig beratend zur Seite stand.

Das Autorenteam bedankt sich ferner bei den Interessensvertretern, die zusammen mit dem Ministerium geholfen haben, praxisrelevante Szenarien zu entwickeln. Dazu beigetragen haben in alphabetischer Reihenfolge der Institutionen: Justus Loebler (BMW), Michael Ziesak (Bundesverband Car Sharing), Norbert Lübben (Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft), Michael Mittag und Stefan Müller (FlixMobility), Stephan Pfeiffer, Ben Pfeifer und Michael Wurm (ioki), Dr. Eva Fraedrich (MOIA) und Nico Gabriel (Sixt). Unser Dank gilt auch den Stakeholdern, die die Endergebnisse des Projekts auf dem Abschlussworkshop mit dem Ministerium diskutiert haben. Dazu beigetragen haben in alphabetischer Reihenfolge der Institutionen: Michael Ziesak (Bundesverband Car Sharing), Sabine Manghofer und Stefan Müller (FlixMobility), Dr. Nico Kuehnel (MOIA).

Die studentischen Hilfskräfte Aylin Taray, Ghassan Ammar, Kamil Moreau, Rafael Muñoz Nieto an der Technischen Universität München haben zum Gelingen dieses Projektes beigetragen, in dem sie Daten zusammengestellt haben, Analysen durchgeführt haben und Modellläufe ausgewertet haben.

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1940
2.	Bestandsaufnahme.....	2144
2.1.	Ergebnisse der Literaturrecherche.....	2144
2.1.1.	Wegfall von Fahrten und Bemaunung von Straßen.....	2144
2.1.2.	Bündelung von Fahrten auf Fernverkehrsstraßen.....	2242
2.1.3.	Verlagerung auf das Schienennetzwerk.....	2343
2.1.4.	Methodik und Modelle zu Untersuchungen im Fernverkehr.....	2545
2.2.	Analyse aktueller Nachfragedaten.....	2646
2.2.1.	Vorläufige Analyse.....	2848
	Verteilung der Distanz nach Fahrtzweck.....	2848
	Verteilung der Distanz nach Hauptverkehrsmittel.....	3121
2.2.2.	Analyse des Verkehrsverhaltens auf Fernreisen.....	3525
	Analyse der Verkehrserzeugung.....	3626
	Analyse für die Fahrtenzielwahl.....	3727
	Analyse der Verkehrsmittelwahl.....	3828
2.2.3.	Daten der Verkehrsverflechtungsprognose.....	4131
2.2.4.	Straßenverkehrszählungen.....	4333
2.3.	Straßen- und landgebundene öffentliche Verkehrs- und Luftverkehrsnetze.....	4535
2.3.1.	Netzwerke.....	4535
	Straßennetz.....	4535
	Landgebundenes öffentliches Verkehrsnetz.....	4636
	Luftverkehrsnetz.....	4838
2.3.2.	Fahrtkostenberechnung.....	5040
2.3.3.	Reisezeitmatrizen.....	5242
3.	Daten und Methoden.....	5444
3.1.	Eingabedaten.....	5444
3.1.1.	Zonensystem.....	5444
3.1.2.	Synthetische Bevölkerung.....	5646
	Synthetische Bevölkerung für das Basisjahr 2011.....	5646
	Synthetische Bevölkerung für das Jahr 2030.....	6050
3.1.3.	Implementierung der Infrastrukturmaßnahmen für das Szenario 2030.....	6555
	Auswahl der Infrastrukturmaßnahmen.....	6555
	Informationsbeschaffung zu den Baumaßnahmen.....	6757
	Modellierung der Baumaßnahmen.....	6858
3.2.	Agentenbasiertes Modell.....	6959
3.2.1.	Personenfernverkehr.....	7060
	Fernfahrtengenerierung.....	7161
	Fernfahrtenzielwahl.....	7464
	Verkehrsmittelwahl.....	7969

Wahl der Abfahrtszeit .....	8373
3.2.2. Personennahverkehr .....	8676
3.2.3. Güterverkehr .....	9080
3.2.4. Verkehrsumlegung .....	9184
3.2.5. Modellvalidierung .....	9383
3.3. Aggregiertes Netzwerkmodell .....	9787
3.3.1. Aggregiertes Netzwerk: Fernverkehrsstraßen, Bahn- und Buslinien .....	9888
3.3.2. Verwendete Nachfragedaten .....	9989
3.3.3. Modellierung der Zu- und Abfahrten ins aggregierte Netzwerk .....	10090
3.3.4. Aggregation und Kosten des Verbindungslayers .....	10194
3.3.5. Modellierung von Modal Split und Belastung der Bundesfernstraßen .....	10393
3.3.6. Modellvalidierung .....	10898
3.4. Szenarien .....	110400
3.4.1. Szenario 1: Verbesserung der lokalen Anbindung an die Bahn durch nachfrageorientierte Mobilitätssysteme .....	110400
3.4.2. Szenario 2: Erweiterung des Fernbusnetzes und Anpassung der Besteuerung .....	112402
3.4.3. Szenario 3: Deutschlandtakt im Bahnverkehr und Koordinierung mit dem ÖPNV .....	113403
3.4.4. Szenario 4: Einführung einer entfernungsabhängigen Maut .....	114404
3.4.5. Szenario 5: Deutschlandtakt, Koordinierung mit dem ÖPNV und zusätzliche nachfrageorientierte Mobilitätssysteme (Szenarien 1 + 2 + 3) .....	115405
3.4.6. Szenario 6: Maut und Optimierung des öffentlichen Verkehrs (Szenarien 1 + 2 + 3 + 4) .....	115405
3.4.7. Szenario 7: Bepreisung aller gefahrenen Fahrzeugkilometer .....	116406
3.5. Indikatoren .....	116406
3.5.1. Agentenbasiertes Modell .....	117407
3.5.2. Aggregiertes Modell .....	122412
4. Schlussfolgerungen .....	192414
4.1. Einschätzung der Modelle .....	213414
4.2. Limitationen und Ausblick .....	216416
4.3. Handlungsempfehlungen .....	218418
5. Literaturverzeichnis .....	223418
6. Tabellenverzeichnis .....	229425
7. Bildersverzeichnis .....	234427
1. Einleitung .....	10
2. Bestandsaufnahme .....	11
2.1. Ergebnisse der Literaturrecherche .....	11
2.1.1. Wegfall von Fahrten und Bemaßung von Straßen .....	11
2.1.2. Bündelung von Fahrten auf Fernverkehrsstraßen .....	12
2.1.3. Verlagerung auf das Schienennetzwerk .....	13
2.1.4. Methodik und Modelle zu Untersuchungen im Fernverkehr .....	15
2.2. Analyse aktueller Nachfragedaten .....	16
2.2.1. Vorläufige Analyse .....	18

Verteilung der Distanz nach Fahrtzweck.....	18
Verteilung der Distanz nach Hauptverkehrsmittel.....	21
2.2.2. Analyse des Verkehrsverhaltens auf Fernreisen.....	25
Analyse der Verkehrserzeugung.....	26
Analyse für die Fahrtenzielwahl.....	27
Analyse der Verkehrsmittelwahl.....	28
2.2.3. Daten der Verkehrsverflechtungsprognose.....	31
2.2.4. Straßenverkehrszählungen.....	33
2.3. Straßen- und landgebundene öffentliche Verkehrs- und Luftverkehrsnetze.....	35
2.3.1. Netzwerke.....	35
Straßennetz.....	35
Landgebundenes öffentliches Verkehrsnetz.....	36
Luftverkehrsnetz.....	38
2.3.2. Fahrtkostenberechnung.....	40
2.3.3. Reisezeitmatrizen.....	42
3. Daten und Methoden.....	44
3.1. Eingabedaten.....	44
3.1.1. Zonensystem.....	44
3.1.2. Synthetische Bevölkerung.....	46
Synthetische Bevölkerung für das Basisjahr 2011.....	46
Synthetische Bevölkerung für das Jahr 2030.....	50
3.1.3. Implementierung der Infrastrukturmaßnahmen für das Szenario 2030.....	55
Auswahl der Infrastrukturmaßnahmen.....	55
Informationsbeschaffung zu den Baumaßnahmen.....	57
Modellierung der Baumaßnahmen.....	58
3.2. Agentenbasiertes Modell.....	59
3.2.1. Personenfernverkehr.....	60
Fernfahrtengenerierung.....	61
Fernfahrtenzielwahl.....	64
Verkehrsmittelwahl.....	69
Wahl der Abfahrtszeit.....	73
3.2.2. Personennahverkehr.....	76
3.2.3. Güterverkehr.....	80
3.2.4. Verkehrsumlegung.....	81
3.2.5. Modellvalidierung.....	83
3.3. Aggregiertes Netzwerkmodell.....	87
3.3.1. Aggregiertes Netzwerk: Fernverkehrsstraßen, Bahn- und Buslinien.....	88
3.3.2. Verwendete Nachfragedaten.....	89
3.3.3. Modellierung der Zu- und Abfahrten ins aggregierte Netzwerk.....	90
3.3.4. Aggregation und Kosten des Verbindungslayers.....	91
3.3.5. Modellierung von Modal Split und Belastung der Bundesfernstraßen.....	93
3.3.6. Modellvalidierung.....	98





3.5.1. Agentenbasiertes Modell.....	112	Formatiert	...
3.5.2. Aggregiertes Modell.....	117	Formatiert	...
4. Ergebnisse.....	119	Formatiert	...
4.1. Basisszenario.....	119	Formatiert	...
4.1.1. Agentenbasiertes Modell.....	119	Formatiert	...
4.1.2. Aggregiertes Modell.....	127	Formatiert	...
4.2. Szenario 1.....	128	Formatiert	...
4.2.1. Agentenbasiertes Modell.....	128	Formatiert	...
Eingabedaten.....	128	Formatiert: Absatz-Standardschriftart, Rechtschreibung und Grammatik prüfen	...
Sensitivitätsanalyse.....	134	Formatiert: Absatz-Standardschriftart, Rechtschreibung und Grammatik prüfen	...
Indikatoren.....	132	Formatiert	...
4.2.2. Aggregiertes Modell.....	136	Formatiert	...
4.3. Szenario 2.....	138	Formatiert	...
4.3.1. Agentenbasiertes Modell.....	138	Formatiert	...
Eingabedaten.....	138	Formatiert	...
Sensitivitätsanalyse.....	142	Formatiert	...
Indikatoren.....	143	Formatiert	...
4.3.2. Aggregiertes Modell.....	147	Formatiert	...
4.4. Szenario 3.....	148	Formatiert	...
4.4.1. Agentenbasiertes Modell.....	148	Formatiert	...
Eingabedaten.....	148	Formatiert	...
Sensitivitätsanalyse.....	154	Formatiert	...
Indikatoren.....	155	Formatiert	...
4.4.2. Aggregiertes Modell.....	159	Formatiert	...
4.5. Szenario 4.....	161	Formatiert	...
4.5.1. Agentenbasiertes Modell.....	161	Formatiert	...
Eingabedaten.....	161	Formatiert	...
Integration in das Verkehrsmittelwahlmodell.....	164	Formatiert	...
Sensitivitätsanalyse.....	165	Formatiert	...
Indikatoren.....	165	Formatiert	...
4.5.2. Aggregiertes Modell.....	170	Formatiert	...
4.6. Szenario 5.....	171	Formatiert	...
4.6.1. Agentenbasiertes Modell.....	171	Formatiert	...
Eingabedaten.....	171	Formatiert	...
Indikatoren.....	172	Formatiert	...
4.6.2. Aggregiertes Modell.....	176	Formatiert	...
4.7. Szenario 6.....	177	Formatiert	...
4.7.1. Agentenbasiertes Modell.....	177	Formatiert	...
Eingabedaten.....	177	Formatiert	...
Integration in das Modell der Verkehrsmittelwahl.....	177	Formatiert	...
Indikatoren.....	178	Formatiert	...
4.7.2. Aggregiertes Modell.....	181	Formatiert	...

4.8.	Szenario 7 .....	182
4.8.1.	Agentenbasiertes Modell .....	182
4.8.2.	Aggregiertes Modell .....	186
5.	Schlussfolgerungen .....	187
5.1.	Diskussion .....	187
5.2.	Einschätzung der Modelle .....	208
5.3.	Limitationen und Ausblick .....	214
5.4.	Handlungsempfehlungen .....	213
6.	Literaturverzeichnis .....	218
7.	Tabellenverzeichnis .....	224
8.	Bilderverzeichnis .....	228

- Formatiert:** Absatz-Standardschriftart, Rechtschreibung und Grammatik prüfen
- Formatiert:** Absatz-Standardschriftart, Schriftart: Nicht Kursiv, Rechtschreibung und Grammatik prüfen
- Formatiert:** Absatz-Standardschriftart, Rechtschreibung und Grammatik prüfen
- Formatiert:** Absatz-Standardschriftart, Schriftart: Nicht Kursiv, Rechtschreibung und Grammatik prüfen

# 1. Einleitung

Das Ziel eines effizienten und nachhaltigen Verkehrssystems erfordert eine Verringerung der Verkehrsbelastung des Straßennetzwerks. Um künftige Klimaschutzziele einzuhalten, ist es außerdem notwendig, dass die Emissionen im Verkehrssektor deutlich reduziert werden. In diesem Projekt wird der Fokus auf Potentiale im Personenfernverkehr gelegt.

Im Rahmen des Projekts wurden mögliche Verkehrsverlagerungen von der Straße auf andere Verkehrsträger mit geringeren Umweltauswirkungen untersucht. Die Methode basiert auf einem zweiskaligen Modellansatz. Sie kombiniert die Effizienz eines aggregierten Modells mit dem Detailgrad eines agentenbasierten Modells.

Der Einsatz dieser Modelle ermöglicht die Simulation von Szenarien, die die Nutzung des öffentlichen Verkehrs fördern oder die Nutzung von Privatfahrzeugen einschränken, wie z. B. Netzwerkverbesserungen oder Mautgebühren. Das Untersuchungsgebiet des Verkehrsnachfragemodells umfasst Deutschland und seine Umgebung und deckt alle Verkehrsträger ab. Die Analyse konzentriert sich auf den Fernverkehr, der auf dem Bundesstraßennetz den größten Anteil des Verkehrsaufkommens darstellt.

Der vorliegende Schlussbericht gibt Entwicklung von Verkehrsnachfragemodellen ~~die Ergebnisse der Projektarbeiten wieder~~. Der Bericht gliedert sich in 4 Hauptkapitel. Kapitel 2 fasst die bisherigen Arbeiten in diesem Bereich aus der Literatur zusammen. Es zeigt die aktuelle Situation von Verkehrsnachfrage und -angebot und beschreibt die wichtigsten Datenquellen, die für das Projekt verwendet wurden. Im Abschnitt 2.2. werden die aktuellen Nachfragedaten analysiert, während sich das Kapitel 2.3. auf die Angebotsdaten konzentriert, die die bestehenden Verkehrsnetze beschreiben.

In Kapitel 3 wird die Entwicklung von Verkehrsnachfragemodellen beschrieben. Es beginnt mit der Definition der wichtigsten Eingangsdaten der verwendeten Modelle: das Zonensystem und die synthetische Bevölkerung. Die beiden in diesem Projekt entwickelten Modellansätze werden ebenfalls beschrieben. Das Kapitel 3 endet mit der Definition von Szenarien und Indikatoren.

In Kapitel 4 werden die Diskussion der Methoden dargestellt.

~~In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Modelle dargestellt, die im letzten Kapitel 5 analysiert und diskutiert werden.~~



## 2. Bestandsaufnahme

### 2.1. Ergebnisse der Literaturrecherche

Um künftige Klimaschutzziele einzuhalten, ist es notwendig, dass die Emissionen im Verkehrssektor deutlich reduziert werden. In diesem Projekt wird der Fokus auf Potentiale im Personenfernverkehr gelegt. Zur Abschätzung von Emissionsreduktionen im Personenfernverkehr ist es notwendig, den Status Quo zu verstehen. Durch lokale Messeinrichtungen, z.B. Induktionsschleifen oder Radargeräte (TREIBER, KESTING und WILSON 2011), sowie Reisezeitmessungen, z.B. mittels Floating-Cars oder Bluetooth-Sensorik (REMPE et al. 2017, KESSLER, et al., 2019), kann die aktuelle Verkehrssituation analysiert werden. Diese Daten können auch genutzt werden, um Verkehr mittels Streckenbeeinflussungsanlagen gemäß der Verkehrssituation zu steuern (KESSLER et al. 2018, REMPE et al., 2017) und dadurch beispielsweise durch die Vermeidung von Stop&Go Verkehr die lokalen Schadstoffemissionen zu reduzieren.

Größere Effekte auf Emissionswerte kann man sich durch eine geringere Anzahl an privaten Fahrten erhoffen. Eine Verringerung des mit dem privaten Fahrzeug durchgeführten individuellen Fernverkehrs kann vorwiegend durch drei Prozesse erreicht werden:

1. durch einen Wegfall von Mobilität, d.h. Fahrten werden nicht durchgeführt, weil zum Beispiel wegen einer Maut auf Fernverkehrsstraßen ein anderes Ziel für eine Aktivität genutzt wird oder die Aktivität ganz unterlassen wird.
2. durch die Bündelung mehrerer Fahrten entlang der Fernstraßen in einem Kraftfahrzeug, zum Beispiel durch Ridesharing oder Fernbusse.
3. durch eine Verlagerung auf das Schienennetzwerk durch ein besseres Angebot im Schienenfernverkehr und eine bessere Anbindung der Bahnhöfe durch neue Zubringersysteme.

#### 2.1.1. Wegfall von Fahrten und Bemaunung von Straßen

Während der Ausbau von Verkehrsangeboten neuen Verkehr induzieren kann, kann die Verlangsamung oder Verteuerung von Verkehrsangeboten auch Fahrten unterdrücken. Bei diesen nicht durchgeführten Fahrten spricht man von latenter Nachfrage. Während solche nicht realisierte Nachfrage sich positiv auf den Verkehrsfluss der verbleibenden Fahrzeuge und damit auch positiv

auf die Umwelt auswirkt, kann unterdrückte Mobilität auch soziale und kulturelle Interaktionen einschränken, wenn zum Beispiel ein Besuch bei Verwandten unterlassen oder ein Museum nicht besucht wird.

Auf deutschen Autobahnen existiert bereits seit dem 01.01.2005 eine LKW-Maut, die am 01.07.2018 auf alle Bundesstraßen ausgeweitet wurde. Durch die Maut sollen jährlich rund 7,2 Milliarden Euro eingenommen werden, die dem Erhalt und Ausbau der Infrastruktur dienen können (Toll Collect 2018). Außerhalb Deutschlands müssen in den meisten europäischen Ländern auch private Kraftfahrzeuge Gebühren für die Nutzung von Autobahnen zahlen (ADAC 2020). Neben den finanziellen Einnahmen für den Staat sorgt die Einführung einer Maut auch für eine reduzierte Attraktivität und Belastung der bemauteuten Routen. Im Jahr 2010 wurde im Auftrag des ADAC eine Studie bezüglich einer PKW-Maut auf deutschen Autobahnen unternommen, in der einerseits Vignetten und andererseits nutzungsabhängige Kosten angenommen wurden, wobei der Effekt auf die Gesamtfahrleistung vereinfacht über eine konstante Preiselastizität abgebildet wurde (ADAC 2010). Aus dem städtischen Kontext sind auch dynamische Mautsysteme bekannt, die nicht nur eine Verlagerung weg vom PKW, sondern auch eine zeitliche Verlagerung der Nachfrage weg von den Spitzenstunden bewirken soll (BRACHER und BOGENBERGER 2017). In den europäischen Nachbarländern wird die Maut meist zeitbezogen mit einer Vignette erhoben. Nach Ansicht des Umweltbundesamtes kann dieses Modell jedoch nur in geringem Maße zur Entlastung Umwelt und der Verringerung der Fahrleistung beitragen. Daher wird die fahrleistungsbezogenen PKW-Maut auf dem gesamten deutschen Straßennetz als zielführendste Variante bewertet. (UBA, 2010)

### 2.1.2. Bündelung von Fahrten auf Fernverkehrsstraßen

Mit der Liberalisierung des Fernverkehrs durch Änderungen des Personenbeförderungsgesetzes (PBefG) können seit Januar 2013 Verkehrsanbieter Fahrten ab 50 km in Konkurrenz zur Bahn anbieten. In den ersten drei Jahren nach der Liberalisierung sind sieben Anbieter für Fernbusfahrten in den deutschen Markt eingestiegen, von denen nach mehreren Fusionen und Geschäftsaufgaben seit Ende 2016 nur noch Flixbus in Deutschland operierte. Die Liberalisierung ermöglicht die Verlagerung von Autofahrten hin zu umweltfreundlicheren Busfahrten. Eine Studie an der TU München hat allerdings gezeigt, dass auf der Strecke München-Nürnberg 71% aller Flixbus Nutzer die Bahn genutzt hätten, wenn es Flixbus nicht gäbe (SCHLODER 2017).

Seit 2013 ist die Mitfahrzentrale BlaBlaCar auf dem deutschen Markt aktiv. Die Online Plattform ermöglicht es Fahrern, freie Plätze im Fahrzeug anzubieten, die dann gegen eine Gebühr von

anderen gebucht werden können. Die Firma ist aktuell in 20 Ländern weltweit aktiv. Laut eigenen Angaben hat BlaBlaCar derzeit ca. 20 Millionen Fahrgäste pro Quartal, was fast zweimal der Anzahl der jährlichen Fluggäste von British Airways entspricht. In einer Nutzerumfrage zeigte sich, dass Nutzer mit geringerem Einkommen öfter als Mitfahrer den Service nutzen und Studenten BlablaCar verhältnismäßig häufig nutzen (SCAHEEN et al., 2017). Die Auswirkungen auf das Verkehrsaufkommen im MIV sind noch weitgehend unerforscht. BlaBlaBus ist auch auf einigen Relationen in Deutschland aktiv und macht somit FlixBus Konkurrenz.

### 2.1.3. Verlagerung auf das Schienennetzwerk

Seit einigen Jahren nutzen immer mehr Menschen geteilte Mobilitätsformen, bei denen Mobilität als Dienst verstanden wird. Solche Sharing-Dienste können als Zubringersysteme zum öffentlichen Verkehr (ÖV) verwendet werden, wenn sie neben Rundfahrten auch einfache Fahrten zu oder von ÖV-Stationen zulassen. Ein profitorientiertes Carsharing Unternehmen wird dabei durch eine geschickte Reallokationsstrategie die Fahrzeuge gemäß analysierter Nutzungsmuster positionieren (SCHMÖLLER et al. 2015; HARDT und BOGENBERGER, 2018; WEIKL und BOGENBERGER 2016). Die so geschaffene Fahrzeugverteilung ist entscheidend, da die Entfernung zwischen Kundenstandort und verfügbarem Fahrzeug ausschlaggebend für die Häufigkeit von Buchungen ist (NIELS und BOGENBERGER, 2017). In geringem Umfang lässt sich durch Preisstrategien innerhalb eines Carsharing Systems auch die Zielwahl von Nutzern beeinflussen (LIPPOLDT et al., 2018), wodurch Reiseketten mit ÖV-Haltestellen attraktiver gestaltet werden könnten. Während bei Carsharing die Parkplatzproblematik in der Nähe von ÖV-Haltestellen eine Barriere zu verstärkter Nutzung als Zubringerdienst darstellt, können Fahrräder in der Regel sehr einfach dort abgestellt werden. Bikesharingdienste ermöglichen Kunden eine flexible Anfahrt zum ÖV und steigern so die Attraktivität von intermodalen Wegeketten (GRIFFIN und SENER 2016). Da auch hier Nachfrageasymmetrien auftreten, ist eine gute Verteilung der Fahrradflotte essentiell (REISS und BOGENBERGER 2015). Die Nutzung von Bikesharingangeboten ist zudem wetterabhängig. Insbesondere stärkere Regenfälle schränken die Nutzung von Bikesharing ein (REISS et al., 2015). Ein anderer stark wachsender Bereich im Mobilitätssektor ist Ridesourcing oder Ridehailing, wie zum Beispiel MOIA und Uber. Diese Systeme können im Vergleich zu Carsharing wesentlich effizienter gestaltet werden und könnten im Fall von autonom fahrenden Fahrzeugen sogar günstiger als Carsharing sein (DANDL und BOGENBERGER 2019), insbesondere, da die Fahrzeugverteilung kostengünstig der Nachfrage angepasst werden kann (DANDL et al. 2019). Um Mehrverkehr durch Fahrten zwischen Kundenstandorten auszugleichen, können durch Ridepooling mehrere Kundenanfahrten durch ein Fahrzeug gleichzeitig abgedeckt werden (ENGELHARDT et

al. 2019). SADOWSKY und NELSON (2017) fanden jedoch heraus, dass solche Systeme zu Beginn zwar als Zubringersysteme zum ÖV angenommen wurden, im Laufe der Zeit jedoch mehr und mehr ÖV-Fahrten ersetzt haben.

Laut einer in New York City durchgeführten Umfrage gehen häufige Nutzer von Mitfahrdiensten bei der Nutzung des öffentlichen Personennahverkehrs zurück, nutzen aber verstärkt den Fernverkehr. In diesem Fall übernimmt eine Mitfahrgelegenheit die Rolle eines Zubringerdienstes (CLEWLOW und MISHRA, 2017). Laut einer anderen in den Niederlanden durchgeführten Umfrage nutzen Autofahrer eher Car- und Ridesharing-Dienste als Nutzer des öffentlichen Verkehrs (Morsche, PUELLO, und GEURS, 2019). Demnach würde sich die Akzeptanz eines Mitfahrdienstes positiv auf Staus und Parkprobleme rund um Bahnhöfe auswirken. Darüber hinaus reduzieren Mobilitätsdienste auf Abruf die gefahrenen Fahrzeugkilometer um bis zu 54 % und verringern so den Verkehr und die Fahrzeugflotten in städtischen Gebieten (ZWICK, KUEHNEL, MOECKEL und AXHAUSEN, 2021). Aus ökologischer Sicht würden sich Mitfahrdienste positiv auf die Luftqualität und die Menge der bestehenden Emissionen auswirken, da die Zahl der Einzelfahrzeuge und die Zahl der gesamten Autofahrten (von zu Hause zum Bahnhof und zurück - zum Bringen oder Abholen von Freunden) sinken würde (WRIGHT und NELSON, 2014; GREENBLATT und SAXENA, 2015; MARTIN und VIEGAS, 2017). Darüber hinaus haben neue Mobilitätsdienste das Potenzial, eine Bevölkerung aus einkommensschwächeren Vierteln und Gebieten mit schlechtem öffentlichem Nahverkehr zu bedienen und so die Ungleichheit zu verringern (ABERLE, 2020). Ridesharing-Anbieter wie Alligator Shuttle, door2door, ioki von der Deutschen Bahn, MOIA und andere sind bereits in Deutschland tätig (door2door, 2018; ioki inspiring smart mobility, 2021; MOIA, 2021). Laut (KÖNIG, BONUS, und GRIPPENKOVEN, 2018), die eine Untersuchung über die für die Nutzer wichtigen Ride-Pooling-Konzepte in deutschen Städten durchgeführt haben, gibt es sechs relevante Attribute für die Präferenzen der Reisenden in Bezug auf Ride-Pooling: Fahrpreis, Gehentfernung, Zeitpunkt der Buchung, Verschiebung der Abfahrtszeit, Reisezeit und Informationsangebot.

Es ist wichtig zu bedenken, dass die breite Einführung von Mitfahrdiensten eine Konkurrenz für den Busverkehr darstellt. Die Nutzung neuer Mobilitätsdienste würde die Zahl der Fahrgäste in konventionellen Bussen verringern und sie weniger rentabel machen (LEICH und BISCHOFF, 2019). Wird der Busbetrieb aufgrund von Ineffizienz eingeschränkt, würden mehr Nutzer auf Sammeltaxis umsteigen, und die hohe Präsenz von Sammeltaxis würde sich negativ auf Staus, Lärm und die lokale Luftqualität auswirken und mehr schädliche Abgasemissionen erzeugen. Es wurde bereits festgestellt, dass Ride-Hailing eine induzierte Nachfrage und eine

Verkehrsverlagerung von Fuß-, Rad- oder Transitverkehr erzeugt und zum Anstieg des Verkehrsaufkommens beiträgt (CLEWLOW und MISHRA, 2017). Im Anschluss daran gibt es Studien, die die Auswirkungen von Synergien zwischen dem öffentlichen Nahverkehr und Sammeltaxidiensten untersuchen (SHEN, ZHANG und ZHAO, 2018; BISCHOFF und MACIEJEWSKI, 2020). Nach Abschluss der Literaturrecherche gab es keine Studien, die sich speziell mit der gemeinsamen Nutzung von Diensten als Zubringer für öffentliche.

#### 2.1.4. Methodik und Modelle zu Untersuchungen im Fernverkehr

Die wichtigste Methode in der Analyse der Verkehrsmittelwahl sind Modelle, die den Modal Split für verschiedene Szenarien untersuchen. Dabei sind Fernverkehrsmodelle zu unterscheiden von Modellen, die den Nahverkehr abbilden, weil sie mit anderen Entscheidungsgrundlagen arbeiten. Im Nahverkehr spielen Zeitgewinne von wenigen Minuten eine wichtige Rolle, während im Fernverkehr Reisekomfort in der Regel höher gewertet wird. Für den Bundesstaat North Carolina, USA wurde ein Verkehrsmittelwahlmodell speziell für den Fernverkehr entwickelt (MOECKEL et al., 2015). In diesem Modell wurde vor allem das Potential zum Ausbau des Eisenbahnnetzes erfolgreich untersucht. Insbesondere der Fahrzweck hat einen Einfluss auf die Gewichtung der Faktoren des Verkehrsmittelwahlmodells. MAGDOLEN et al. (2020) untersuchten Daten des Deutschen Mobilitätspanels und unterscheiden zwischen alltäglichen und touristischen Fahrten. Im untersuchten Datensatz machen nicht-alltägliche Fahrten zwar nur ca. 10% der Fahrten aus, dies ist jedoch ca.  $\frac{1}{3}$  der zurückgelegten Distanzen. Dass je nach Fahrzweck verschiedene Verkehrsmittel verwendet werden, wird auch in der Untersuchung zu Tagesreisen deutlich. Tagesreisen sind Reisen, bei denen die Hin- und Rückreise am selben Tag stattfinden. Die Untersuchungen von HARRER und SCHERR (2014) ergaben, dass der private PKW das mit Abstand wichtigste Verkehrsmittel für Tagesreisen darstellt. Handelt es sich jedoch um Tagesgeschäftsreisen wird häufiger der Mietwagen, das Taxi, das Flugzeug oder der öffentliche Verkehr genutzt.

In der Bundesverkehrswegeplanung wird auf Basis von Modellrechnungen eine gesamtwirtschaftliche Bewertung durchgeführt, die geplante Bauvorhaben der Infrastruktur bewertet und priorisiert. Eine Kritik besteht darin, dass verkehrsträgerübergreifende Interdependenzen bisher zu wenig darin berücksichtigt werden. Sie werden Abschlüsse in den Nutzen-Kosten-Faktoren berücksichtigt, welche jedoch von Kritikern als nicht angemessen angesehen werden (HAHN, 2000). Es gibt keine vollständige verkehrsträgerübergreifende Gesamtplanung, die die Abhängigkeiten zwischen den Verkehrsträgern vollständig berücksichtigt.

Interdependenzen werden bislang in der BVWP nur für Fernverkehrsbeziehungen (RIN Verbindungsfunktionsstufe 0 für den kontinentalen Verkehr zwischen den Metropolregionen und für den großräumigen Verkehr zwischen Oberzentren und zwischen diesen und Metropolregionen) betrachtet, aber nicht für regionale Beziehungen (z. B. Bundesstraßenausbau parallel zu Nebenbahnen). Die Ergebnisse der Interdependenzberechnungen im BVWP wurden nur aggregiert im Gesamtbericht angegeben. Durch eine detaillierte Modellierung wie in einem agentenbasierten Modell könnten solche Effekte besser abgebildet werden.

Für die Provinz Ontario in Kanada wurde ein Fernverkehrsmodell mit Fahrtengenerierung, Zielwahl und Verkehrsmittelwahl als agentenbasiertes Modell aufgebaut (LLORCA, et al. 2018a). Dabei wurden Tagesfahrten von Fahrten mit Übernachtung unterschieden, um einfache Wege von Hin- und Rückfahrten an einem Tag zu unterscheiden. Für das Zielwahlmodell wurden Daten aus den Sozialen Medien (Foursquare) genutzt, um die Wahl des Reiseziels besser vorhersagen zu können. Das Verkehrsmittelwahlmodell nutzte Informationen der Webseite [rome2Rio.com](http://rome2Rio.com), um Reisezeiten, -kosten und -häufigkeit der Verbindung zu ermitteln. Logitmodelle wurden geschätzt, um die Nachfrage nach Hochgeschwindigkeitszügen von Detroit nach Montreal abzuschätzen (LLORCA et al. 2018b). Für den Bundesstaat Maryland in den USA wurde ferner untersucht, inwieweit Benzinpreiserhöhungen, Parkgebühren und Flächennutzungsplanung den MIV Anteil reduzieren können (MOECKEL und LEWIS 2017).

In jüngerer Zeit wurden zwei deutschlandweite Verkehrsmodelle entwickelt. WINKEL und MOCANU (2017) haben ein fahrtenbasiertes Gleichgewichtsmodell für Deutschland entwickelt. Das Modell bildet Nah- und Fernverkehr ab, sowohl für den Personenverkehr als auch für den Güterverkehr. Leider ist das Modell proprietär und steht nicht für Analysen zur Verfügung. ILLENBERGER hat ein deutschlandweites Modell in der MATSim Umgebung entwickelt (siehe <https://matsim.org/gallery/germany>). Dieses Modell simuliert ausschließlich den MIV, der öffentliche Verkehr oder der Güterverkehr werden dabei nicht abgebildet.

## 2.2. Analyse aktueller Nachfragedaten

Die beiden Nachfragemodelle, die für dieses Projekt entwickelt werden, müssen in der Lage sein, das Verkehrsverhalten der realen Welt abzubilden. Um dieses Ziel zu erreichen, ist das Verständnis des derzeitigen Verkehrsverhaltens ein wichtiger erster Schritt. In diesem Kapitel werden die aktuellen Nachfragedaten analysiert, um ein Abbildung des Verkehrsverhaltens in Deutschland zu erfassen.

Die Nachfragedaten, die für diese Analyse verwendet wurden, kommen aus der deutschlandweiten Verkehrserhebung Mobilität in Deutschland 2017 (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2017). MiD 2017 ist eine bundesweite Haushaltsbefragung zum Verkehrsaufkommen, die vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Jahr 2017 durchgeführt wurde. Diese Erhebung beinhaltet Angaben zum Mobilitätsverhalten sowie persönliche und haushaltsbezogene Attribute der Befragten. Erwähnenswert ist, dass mit der MiD 2017 zwei Mobilitätsdatensätze zur Verfügung stehen:

- **Tägliche Fahrdaten:** Dieser Datensatz enthält alle Fahrten, welche die Befragten am Tag vor Erhalt der Umfrage unternommen haben. Diese Art von Fahrten finden regelmäßig statt.
- **Reisen mit Übernachtung:** Dieser Datensatz enthält Reisen, bei denen die Befragten an einen anderen Ort reisen und dort mindestens eine Übernachtung haben (unabhängig von der Entfernung). Die Übernachtungsreisen der letzten drei Monate wurden über die Befragten erhoben. Allerdings wurden nur die letzten drei dieser Fahrten dabei im Detail erhoben.

Die Unterscheidung dieser zwei Datensätze liefert wichtige Erkenntnisse für die Klassifizierung von Kurz- und Langstreckenreisen. Üblicherweise geht man davon aus, dass Tagesreisen eher Kurzstreckenfahrten und Übernachtungsreisen eher Fernreisen sind. Tabelle 2-1 zeigt jedoch, dass beide Datensätze Kurz- und Langstreckenreisen enthalten. Bei täglichen Fahrten liegt die Distanz zwischen 0,01 und 950 Kilometern, während die Fahrstrecke bei Fahrten mit Übernachtung zwischen 1 und 25.000 Kilometern liegt. Dennoch ist die durchschnittliche Reiseentfernung bei Tagesfahrten (12,52 Kilometer) wesentlich kürzer als bei Übernachtungsreisen (739,17 Kilometer).

Fahrdistanz (km)	Min	1. Quantil	Median	3. Quantil	Max	Arithmetisches Mittel
Tagesfahrten	0,01	1,47	3,80	10,80	950,00	12,52
Übernachtungsreisen	1,00	222,00	370,00	700,00	25.000,00	739,17

**Tabelle 2-1. Reiseentfernungen von Tages- und Übernachtungsreisen**

Da das Verkehrsmittelwahlverhalten von Fernreisen im Mittelpunkt dieses Projekts steht, ist es in diesem Projekt von Bedeutung, inwieweit Kurz- und Fernreisen und das jeweilige Verkehrsmittelwahlverhalten unterschieden werden können. Daher wird in den folgenden Abschnitten die Verteilung der Reiseentfernung für beide Fahrtenarten untersucht. Konkret werden Fahrtzweck und Hauptverkehrsmittel analysiert. Weiter wird auch das Verhalten von Fernreisen in

Bezug auf Fahrtenerzeugung, Fahrtenzielwahl und Verkehrsmittelwahl analysiert. Mit dieser Analyse können wir einen Gesamtüberblick über das Reiseverhalten erfassen und haben eine Basis für die Anzahl der Datensätze für die Modellschätzung im späteren Schritt.

Außerdem werden in diesem Abschnitt die Daten der Verkehrsverflechtungsprognose des BMVI und die Straßenverkehrszählungen der Autobahnen und Bundesstraßen beschrieben. Sie werden für die Validierung des Modells verwendet.

### 2.2.1. Vorläufige Analyse

#### *Verteilung der Distanz nach Fahrtzweck*

Die MiD gemeldeten Fahrtendistanzen unterscheiden sich deutlich nach Fahrtzweck. Tägliche Einkaufsfahrten und Fahrten zur Schule sind beispielsweise im Durchschnitt kürzer als Arbeits- oder Freizeitreisen. Daher wird im Folgenden die Reiseentfernung nach Fahrtzweck getrennt dargestellt. Allerdings wurden der Fahrtzweck im Datensatz der täglichen Fahrten und im Datensatz der Übernachtungsfahrten unterschiedlich klassifiziert. Im ersten Datensatz sind 7 Fahrtzweck erfasst, nämlich Arbeit, Ausbildung, Dienstreisen, Einkauf, Erledigung, Begleitung und Freizeit. Im zweiten Datensatz werden 5 Fahrtzweck erfasst, nämlich Urlaub, Besuche, Privatreisen, Geschäftsreisen und eine allgemeine Kategorie "andere".

Bild 2-1 zeigt die Verteilung der Entfernung nach Fahrtzweck der täglichen Fahrten. Unabhängig vom Fahrtzweck nimmt die Anzahl der Fahrten ab, je länger die Entfernung ist. Ausbildungs-, Einkaufs- und Begleitfahrten haben einen hohen Anteil an Fahrten (mehr als 70%) im Bereich von 0 bis 5 km. Arbeits- und Dienstreisen haben einen geringeren Anteil an Fahrten innerhalb von 5 km und die Anzahl der Fahrten nimmt mit zunehmender Entfernung langsamer ab als bei den anderen Zwecken. Im Allgemeinen haben Arbeits- und Dienstreisen zwischen 10 und 40 km einen höheren Anteil als die anderen Fahrtzwecke. Der Anteil der Fahrten mit Entfernungen über 50 km ist bei allen Fahrtzwecken sehr gering.

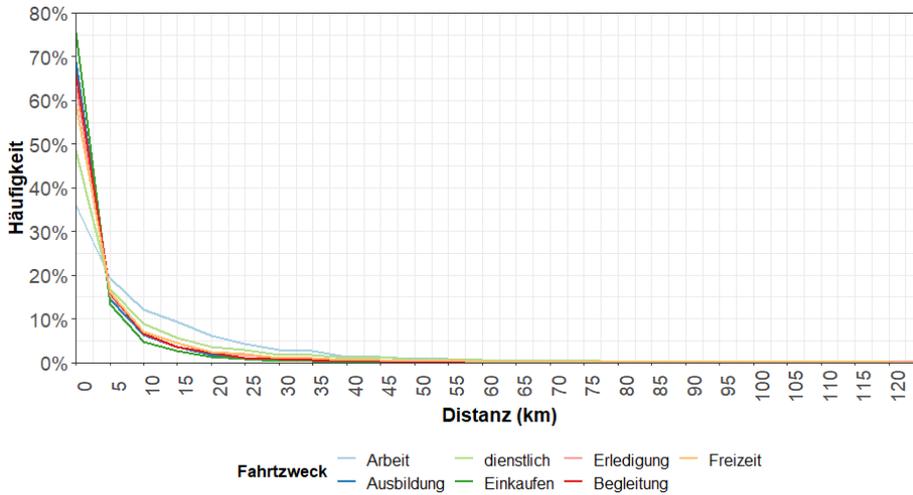
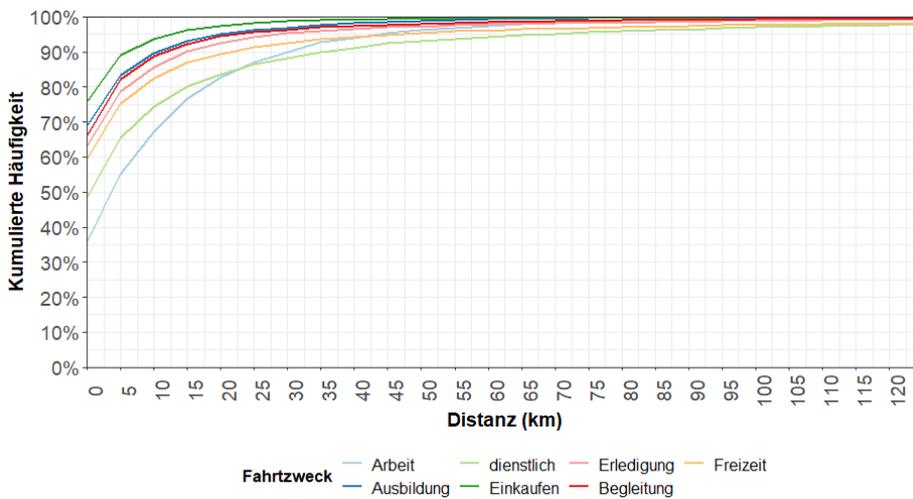


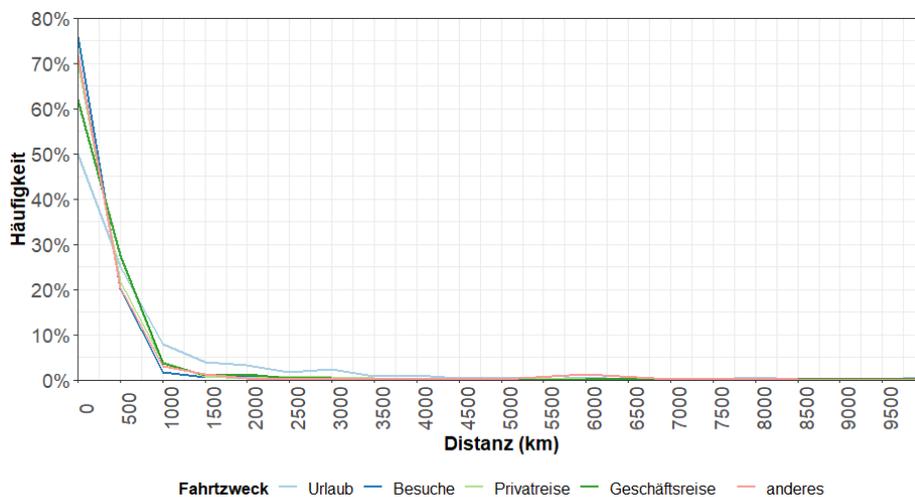
Bild 2-1. Verteilung der Entfernung nach Wegezweck von Tagesfahrten (Wege Datensatz der MiD)

Die folgende Bild zeigt die kumulative Fahrtendistanzverteilung nach Fahrtzweck. Aus dieser Grafik ist ersichtlich, dass 95% der Fahrten in den Bereichen Einkauf, Ausbildung, Begleitung und Erledigung weniger als 20 km betragen. Bei Arbeit, Freizeit und Dienstreisen sind 95% der Fahrten weniger als 50 km lang.



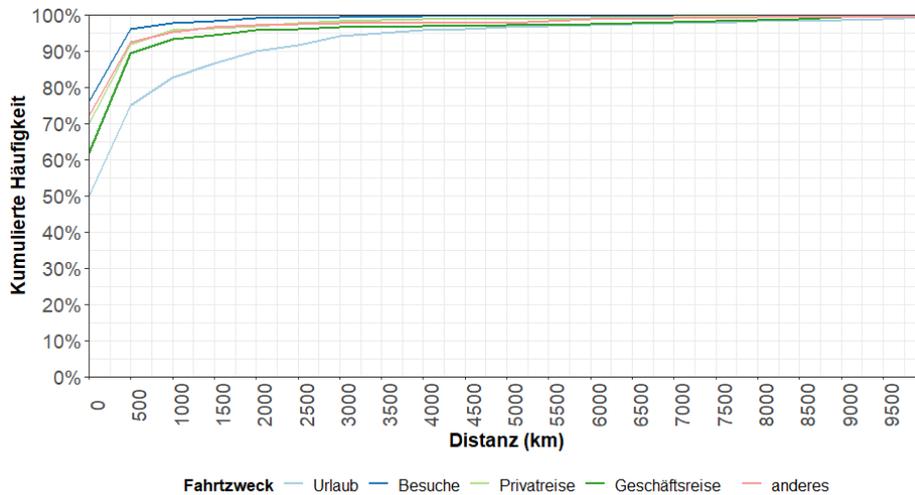
**Bild 2-2. Kumulierte Fahrtenlängenverteilung nach Wegezweck von Tagesfahrten (Wege Datensatz der MiD)**

Bild 2-3 zeigt die Reisedistanzverteilung von Übernachtungsreisen je Fahrtzweck. Der Anteil der kürzeren Reisen mit Übernachtung (zwischen 0 und 100 Kilometern) liegt zwischen 5% und 15% je nach Fahrtzweck. Bis zu etwa 100 km nimmt die Zahl der Reisen mit Übernachtung für alle Fahrtzwecke zu, und anschließend deutlich ab. Der Anteil von Fahrten mit mehr als 1.000 km ist vergleichsweise gering.



**Bild 2-3. Verteilung der Reisedistanzen nach Fahrtzweck von Übernachtungsfahrten (Reise Datensatz der MiD)**

Bild 2-4 zeigt die kumulative Reiselängenverteilung nach Fahrtzwecken. 75% der Besuche, Privatreisen und Geschäftsreisen als Übernachtungsreisen liegen im Rahmen von 500 Kilometern. Bei Urlaubsreisen sind die Reisedistanzen etwas länger als bei den anderen 4 Fahrtzwecken.



**Bild 2-4. Kumulative Reisedistanzverteilung nach Fahrtzweck von Übernachtungsreisen (Reise Datensatz der MiD)**

#### Verteilung der Distanz nach Hauptverkehrsmittel

Die Wahl des Verkehrsmittels eine wichtige Kenngröße, die das Modell abbilden können muss. Bei täglichen Fahrten und Langstreckenreisen gibt es unterschiedliche Optionen bei der Verkehrsmittelwahl. Daher wird der Anteil der verschiedenen Verkehrsmittel nach kürzeren und längeren Fahrten unterschieden.

Die Hauptverkehrsmittel, die im Tagesfahrendatensatz und im Übernachtungsreisedatensatz erhoben werden, sind unterschiedlich. Bei Tagesfahrten werden 11 Verkehrsmittel unterschieden: zu Fuß, Fahrrad, Motorrad, Auto, öffentlicher Nahverkehr, Fernzug, Fernbus, Charterbus, Flugzeug, Schiff und andere. Im Datensatz für Übernachtungsfahrten gibt es Fahrrad, Auto, Zug, Fernzug, Fernbus, Reisebus, Flugzeug, Schiff und andere. Sie werden jeweils in den folgenden Abschnitten detaillierter dargestellt.

Bild 2-5 zeigt die Verteilung der Fahrtstrecke nach Hauptverkehrsmittel. Es zeigt sich, dass die Anzahl der Fahrten mit nicht-motorisierten Verkehrsmitteln kurze Distanzen dominiert. Andere Verkehrsmittel (Flugzeug, Schiff und Fernzug) dominieren längere Distanzen auf Tagesreisen.

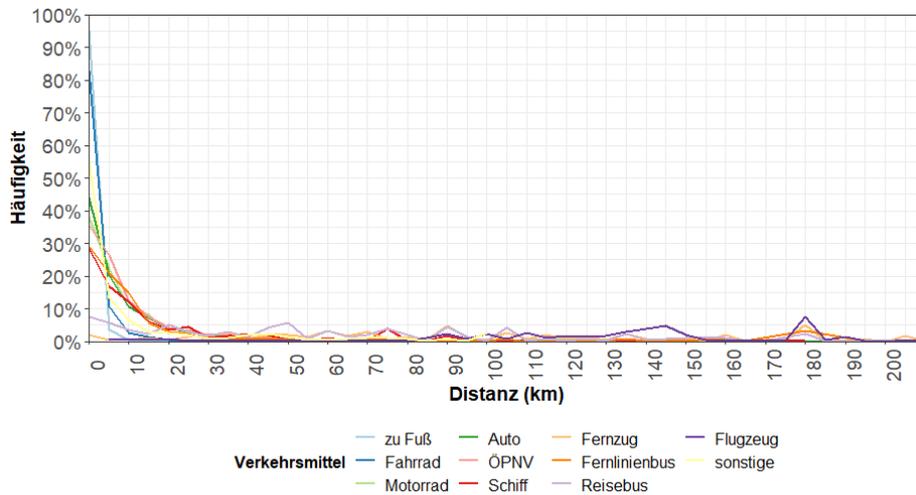


Bild 2-5. Verteilung der Fahrtentfernung nach Hauptverkehrsmittel für Tagesfahrten (Wege Datensatz der MiD)

Bild 2-6 bestätigt, dass zu Fuß und das Fahrrad vor allem für kurze tägliche Fahrten genutzt wird. Motorrad, Auto, und "sonstige" werden für ähnliche Distanzen verwendet. Vor allem Reisebus, Fernzug und Flugzeug werden am ehesten für längere Tagesreisen verwendet.

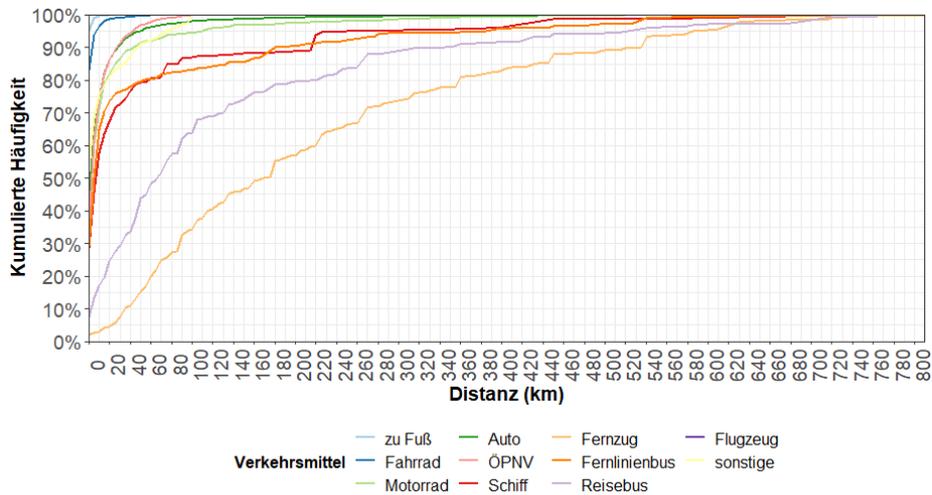
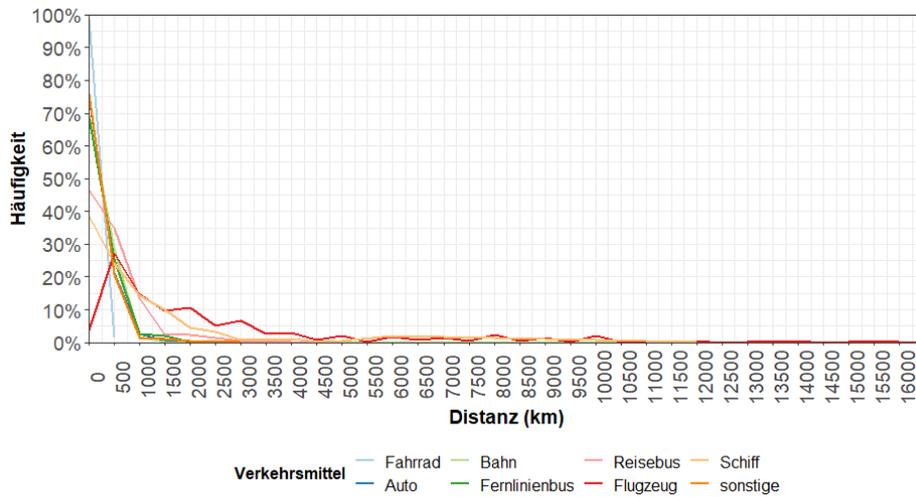


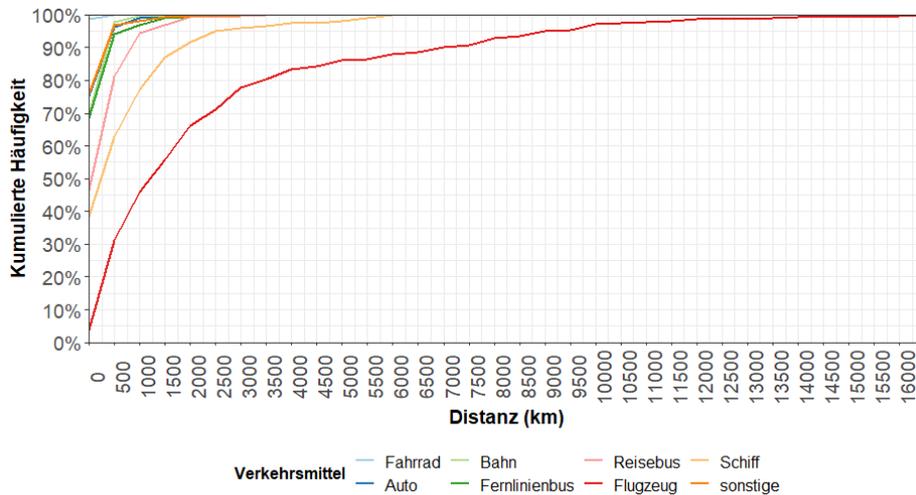
Bild 2-6. Kumulative Verteilung der Fahrtentfernung nach Hauptverkehrsmittel für Tagesfahrten (Wege Datensatz der MiD)

Das Fahrrad wird für Übernachtungsreisen genutzt, solange die Entfernungen eher gering sind. Es gibt jedoch auch Fälle extremer Langstreckenradfahrten. Andere Verkehrsmittel lassen sich besser in Bild 2-7 unterscheiden.



**Bild 2-7. Verteilung der Reiseentfernung nach Verkehrsmittel bei Übernachtungsreisen (Reise Datensatz der MiD)**

Bild 2-8 zeigt die kumulative Fahrstreckenverteilung nach Verkehrsmittel für Reisen mit Übernachtung. Auto, Bahn und Fernlinienbus haben eine sehr ähnliche Verteilung der Reisedistanzen. Häufig konkurrieren diese drei Verkehrsmittel direkt miteinander. Reisebus, Schiff und Flugzeug bedienen längere Fahrten, wobei die längsten Reiseentfernungen mit dem Flugzeug zurückgelegt werden.



**Bild 2-8. Kumulative Verteilung der Reiseentfernung nach Verkehrsmittel bei Übernachtungsreisen (Reise Datensatz der MiD)**

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sowohl Tages- als auch Übernachtungsreisen Kurz- und Langstreckenreisen generieren, und dass die durchschnittliche Reiseentfernung bei Übernachtungsreisen sehr viel länger ist als bei Tagesreisen. Eine Abgrenzung zwischen täglichen und Übernachtungsfahrten ist immer ein bisschen willkürlich. Es zeigt sich aber, dass es nur wenige tägliche Fahrten über 50 km gibt, und dass die meisten Fahrten mit Übernachtung länger als 50 km sind.

### 2.2.2. Analyse des Verkehrsverhaltens auf Fernreisen

Die vorläufige Analyse gab uns einen Überblick über die Reisedistanzen nach Fahrtzweck und Verkehrsmitteln. Dieses Unterkapitel konzentriert sich auf die Analyse des Reiseverhaltens in Bezug auf die Fahrtenerzeugung, die Fahrtenzielwahl und die Verkehrsmittelwahl, die den Modellierungsrahmen dieses Projekts abbilden. Der Schwellenwert für Fernreisen ist durch eine Reisedistanz von 40 km definiert. Die Schwelle für Kurz- und Fernreisen liegt bei 40 km (LLORCA et al., 2018). Die Analyse zeigt das Reiseverhalten in jedem Schritt und die Anzahl der Datensätze für die Modellschätzung in Kapitel 3.

### *Analyse der Verkehrserzeugung*

Die Fahrtengenerierung ist der erste Schritt des Reiseverhaltens, bei dem Personen entscheiden, ob sie eine bestimmte Art von Aktivität durchführen und eine Fahrt für diese Aktivität unternehmen. Bei der Fernreisegenerierung klassifizieren wir das Reisegenerierungsverhalten danach, ob eine Person eine Fernreise unternimmt oder nicht. Bei den Personen, die auf Reisen sind, kann es sich entweder um einen Tagesausflug (Hin- und Rückfahrt in einem Tag), einen Ausflug mit Übernachtung (nur Hin- oder Rückfahrt am Tag) oder unterwegs auf Reise (Hinfahrt vor dem Tag und Rückfahrt nach dem Tag) handeln. Außerdem haben wir die Reisen in drei Kategorien unterschieden: Dienstreise, Freizeitaktivität und Privat. Obligatorische Fahrten, wie z. B. zur Arbeit- und Ausbildung, werden nicht hier, sondern in Modellen des Personennahverkehrs behandelt, da sich obligatorische Kurzstreckenreisen von nicht obligatorischen Fernreisen unterscheiden.

Wir haben die Wegelisten aus dem B3 „Lokal-Datensatzpaket“ in MiD 2017 (B3 Wege). Im Lokal-Datensatzpaket sind die räumlichen Informationen auf der Ebene von mindestens 500x500 Meter großen und mindestens 500 Einwohner umfassenden Gitterzellen enthalten. Die soziodemografischen und -ökonomischen Merkmale wurden jedoch aus Datenschutzgründen aggregiert. Es gibt 316.361 Datensätze in Bezug auf Personen in B3 Wege MiD2017. Da nicht jeder Datensatz über vollständige Personen- und Haushaltsinformationen verfügt und später für die Modellschätzung verwendet werden kann, wurden Daten ohne Geschlecht, Alter, Beruf, Einkommensstatus, Haushaltsgröße, PKW-Besitz und Wohnstandort entfernt. Am Ende haben wir 7,32 % der Datensätze entfernt und 293.216 Datensätze behalten. Die Anzahl der Datensätze nach Fahrtzweck und Fahrtarten ist in Tabelle 2-2 zusammengefasst. Zusätzlich wird auch der gewichtete Anteil von Personen in der Klammer berechnet.

Im Allgemeinen haben etwa 96 % bis 98 % der Befragten am Erhebungstag keine Fernreise unternommen. Stattdessen haben etwa 0,98 % bis 2,00 % der Befragten einen Tagesausflug unternommen, wobei der dienstliche Zweck den geringsten Anteil gegenüber den anderen Zwecken ausmacht. Bei den Fernreisen mit Übernachtung liegt der Anteil je nach Zweck zwischen 0,22 % und 1,80 %. Bei den privaten Übernachtungsreisen ist der Anteil etwas größer als bei den anderen Zwecken. Bei den „Unterwegs auf Fernreise“ ist dies die Minderheit, denn der Anteil liegt je nach Zweck nur zwischen 0,02% und 0,21%. Es gibt auch weniger Datensätze, wobei der höchste mit 614 für Freizeitwecke liegt.

Fahrtzweck	Keine Fernreise	Tagesausflug	Ausflug mit Übernachtung	Unterwegs auf Reise
Privat	284.505 (96,66%)	4.298 (1,46%)	4.194 (1,80%)	219 (0,08%)
Dienstreise	288.426 (98,78%)	3.821 (0,98%)	891 (0,22%)	78 (0,02%)
Freizeitaktivitäten	283.005 (96,37%)	5.411 (2,00%)	4.186 (1,42%)	614 (0,21%)

Anm.: der Prozentsatz in der Klammern ist der gewichtete Anteil der Personen

**Table 2-2. Anzahl der Datensätze und Prozentsatz der gewichteten Personen nach Fahrtzweck und Fahrtarten**

### Analyse für die Fahrtenzielwahl

Für das Zielwahlverhalten lieferte MiD 2017 960.619 Fahrten-Datensätze, einschließlich Kurz- und Langstreckenfahrten. Da sich dieses Projekt auf Langstreckenfahrten konzentriert, müssen wir die Kurzstreckenfahrten weglassen. In diesem Projekt haben wir uns entschieden, die in der Umfrage zur Verfügung gestellten Gitterzellen zu Start und Ziel zu verwenden, um die Fahrdistanz und die Fahrzeit neu zu berechnen. Dieser Ansatz könnte ein höheres Vertrauen in die Datengenauigkeit bieten und die Verzerrung durch Selbstauskunftsfehler reduzieren. Einer der größten Nachteile ist jedoch, dass die Stichprobengröße reduziert wird, da für 30% der Fahrten keine Angaben zum Start- und Zielort vorliegen. Am Ende haben wir 9.557 Langstrecken-Tagesreisen und 2.894 Langstrecken-Nachreisen für die Schätzung des Zielwahlmodells. Die verfügbare Anzahl von Datensätzen für das Zielwahlmodell nach Fahrtzwecken ist in Tabelle 2-3 zusammengefasst.

Fahrtzweck	Tagesausflug	Ausflug mit Übernachtung
Privat	4.881 (51,07%)	1.049 (36,25%)
Dienstreise	1.678 (17,56%)	499 (17,24%)
Freizeitaktivitäten	2.998 (31,37%)	1.346 (46,51%)

**Table 2-3. Anzahl der Datensätze und Prozentsatz der gewichteten Personen nach Fahrtzweck und Fahrtarten**

Die durchschnittliche Reisedistanz nach Fahrtzweck und Fahrtarten in Tabelle 2-4 zusammengefasst. Aus der Tabelle geht hervor, dass Tagesausflüge kürzer sind als solche mit Übernachtung. Bei den Tagesausflügen haben die Privatfahrten (206,60 km) eine längere Fahrstrecke als die beiden anderen Fahrtzwecke, während die Freizeitfahrten (177,23 km) die kürzeste durchschnittliche Fahrstrecke aufweisen. Bei den Übernachtungsreisen haben Dienstreisen (259,97 km) die längste durchschnittliche Reisedistanz, während Freizeitreisen (224,63 km) und Privatreisen (225,01 km) sehr nahe beieinanderliegen.

Fahrtzweck	Tagesausflug	Ausflug mit Übernachtung
Privat	206,60	225,01
Dienstreise	180,43	259,97
Freizeitaktivitäten	177,23	224,63

**Tabelle 2-4. Durchschnittliche Reisedistanz (km) nach Fahrtzweck und Fahrtarten**

### *Analyse der Verkehrsmittelwahl*

Für die Schätzung der Verkehrsmittelwahl im Fernverkehr wurden die Ergebnisse der Umfrage B3 Wege MID 2017 verwendet. Dieser Datensatz besteht aus Tages- und Übernachtungsfahrten, Kurz- und Fernfahrten innerhalb Deutschlands. Zuvor wurden die Angaben im Datensatz auf Plausibilität geprüft. Der Ausgangsdatsatz bestand aus 960.619 Antworten. Da es für die Schätzung der Verkehrsmittelwahl wichtig ist, den Zweck und das verwendete Verkehrsmittel zu kennen, wurden die Datensätze ohne Zweck aus dem Datensatz entfernt, sodass 383.498 Datensätze für die weitere Analyse übrigblieben. Der MiD 2017-Datensatz enthält die Informationen über die Geo-Standorte von Ausgangspunkt und Ziel der Fahrten. Die Genauigkeit des Standorts variiert zwischen 5 km, 1 km und 500 m Rasterzellen. Unter Verwendung des Straßennetzes, das von OpenStreetMaps ([https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map\\_Features](https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_Features)) heruntergeladen wurde, und unter Verwendung von MATSim (AXHAUSEN, NAGEL und HORNI, 2016) wurden die Reisezeit und die Reisedistanz für jede Reiseaufzeichnung geschätzt. Basierend auf diesen geschätzten Reisedistanzen und basierend auf den gemeldeten Reisedistanzen wurden alle verbleibenden Fahrten im Datensatz in Fern- und Nahverkehr charakterisiert. Dabei wurde festgestellt, dass die geschätzten und die gemeldeten Entfernungen extrem widersprüchlich waren, da die gemeldeten Entfernungen 10- bis 100-mal höher oder niedriger waren als die geschätzten Entfernungen (siehe Bild 2-9 und Bild 2-10).

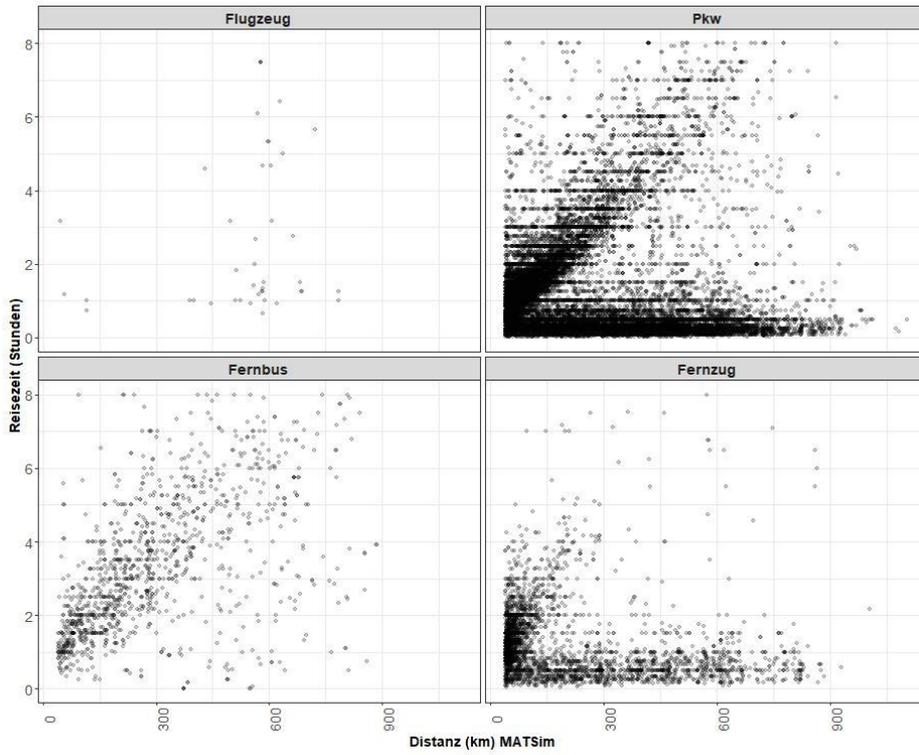
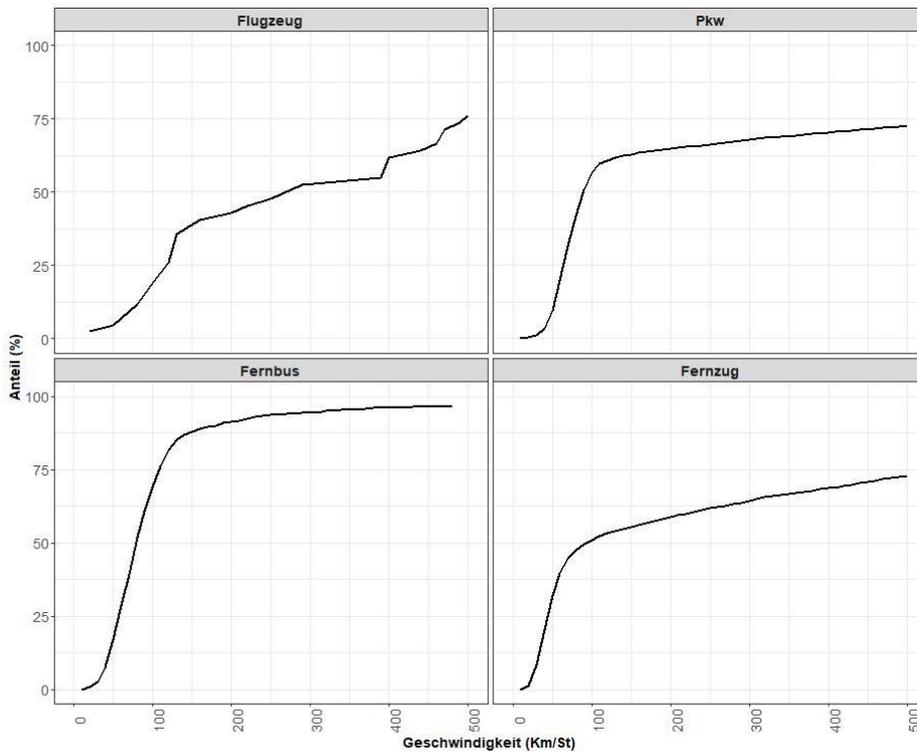


Bild 2-9. Umfrage Reisezeiten und MATSim Distanz



**Bild 2-10. Geschwindigkeitsverteilung (Umfrage Reisezeiten / MATSim Entfernungen)**

Um diese Verzerrung zu vermeiden und nur plausible Datensätze zu berücksichtigen, wurde beschlossen, nur die Datensätze in den Datensatz für die Schätzung des Verkehrsmittelwahlmodells aufzunehmen, bei denen die Differenz zwischen der berichteten und der geschätzten Reisegeschwindigkeit unter 20 % liegt.

Durch diese Auswahl wurden 7.341 Datensätze für Langstreckenfahrten (Fahrten über 40 km gelten als Langstreckenfahrten) als plausibel eingestuft und dieser Datensatz wurde für die Schätzung der Verkehrsmittelwahl für Langstreckenfahrten verwendet. Daraus ergibt sich, dass 5.365 Datensätze in diesem Datensatz Tagesausflüge und 1.976 Ausflüge mit Übernachtung sind. Das Problem der Unplausibilität der zugeordneten Geolokationen wurde im November 2020 an die DLR-Geschäftsstelle gemeldet und konnte bis zur Drucklegung dieses Berichts nicht gelöst werden.

Für die Schätzung des Verkehrsmittelwahlmodells wurden 7.341 Datensätze aus dem B3-Wege-Datensatz verwendet. Bei dieser Schätzung wurden vier Fernverkehrsarten berücksichtigt: Luft, Auto, Bus und Bahn. Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, wurde dieser Datensatz in zwei Datensätze aufgeteilt, die nur Tages- und nur Übernachtungsfahrten enthalten. Die modalen Anteile für jeden Fahrtzweck sind in Tabelle 2-5 und Tabelle 2-6 zusammengefasst.

Fahrtzweck	Private				Dienstreise				Freizeitaktivitäten			
	Auto	Luft	Bus	Zug	Auto	Luft	Bus	Zug	Auto	Luft	Bus	Zug
Verkehrsmittel Anteil (%)	93,48	0,03	2,08	4,40	89,90	0,04	7,71	2,34	91,35	0,01	4,47	4,17

**Tabelle 2-5. Verkehrsmittel Anteile - Tagesausflug**

Fahrtzweck	Private				Dienstreise				Freizeitaktivitäten			
	Auto	Luft	Bus	Zug	Auto	Luft	Bus	Zug	Auto	Luft	Bus	Zug
Verkehrsmittel Anteil (%)	88,97	0,33	9,26	1,44	82,89	1,46	14,51	1,14	90,80	0,43	6,23	2,54

**Tabelle 2-6. Verkehrsmittel Anteile –Ausflug mit Übernachtung**

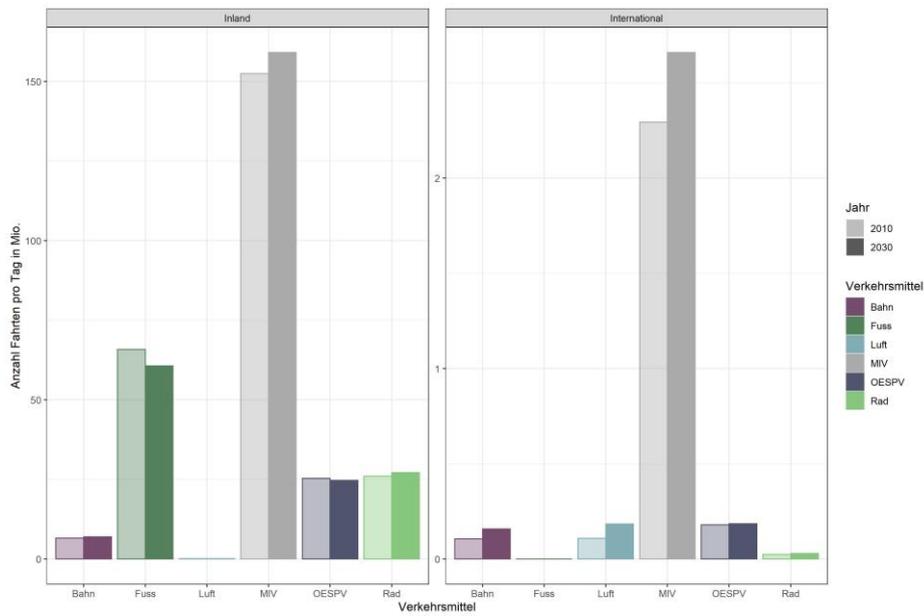
### 2.2.3. Daten der Verkehrsverflechtungsprognose

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur hat einen Datensatz zur Verkehrsprognose erstellt, um die erwartete Nachfrage im Jahr 2030 zu quantifizieren. Diese Prognose wurde in Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung entwickelt.

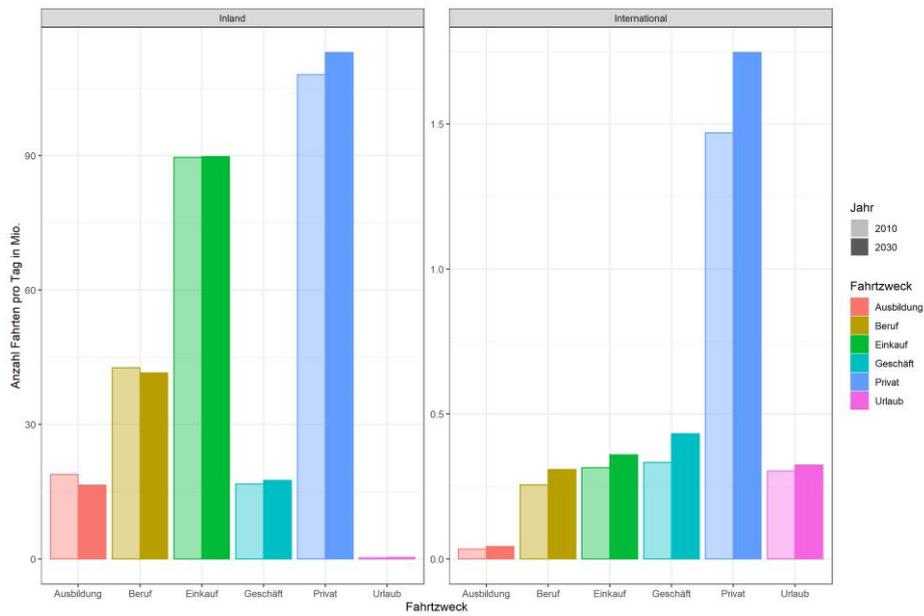
Dieser Datensatz umfasst Quell/Ziel-Matrizen des Ist-Zustands (2010) und der prognostizierten Verkehrsnachfrage (2030). Die Daten umfassen alle Fahrten, die in Deutschland beginnen, enden oder durch Deutschland führen. Im Gegensatz zu Mobilität in Deutschland, schließen die Matrizen der Verkehrsprognose 2030 auch den Durchgangsverkehr und ausländischer Besucher ein.

Der Ist-Zustand Datensatz wurde als eine Kombination aus verschiedenen empirischen Beobachtungen und mit Hilfe eines aggregierten Verkehrsnachfragemodells erstellt (BMVI, 2014). Die Prognose wird mit Hilfe des Modells und unter Berücksichtigung der demografischen Veränderungen im Zeitraum 2010-2030 erstellt.

Die daraus resultierenden Matrizen beschreiben die Anzahl der Fahrten (oder Wege) pro Verkehrsmittel, Fahrtzweck und Jahr in der räumlichen Auflösung von Landkreisen oder Kreisstädten. Die Fahrten werden dem Hauptverkehrsmittel und dem Hauptzweck zugeordnet, um Doppelzählungen zu vermeiden. Die Bild 2-11 fasst die modellierten Fahrten nach Verkehrsmittel und Zweck zusammen, umgerechnet auf die Anzahl der Fahrten an einem durchschnittlichen Tag.



**Bild 2-11. Anzahl der Fahrten nach Verkehrsmittel (Bahn schließt Fernverkehr, Regional- und S-Bahn ein, OESPV umfasst Reisebus, Fernlinienbus, Stadt- und Regionalbus, U-Bahn und Tram).**



**Bild 2-12. Anzahl der Fahrten nach Fahrzweck**

Weil dieser Datensatz extrem aggregiert ist (räumlich und vor allem zeitlich) und er bereits ein Output eines anderen Modells ist, entschieden wir uns, diese Daten nicht zur Entwicklung eines Modells für dieses Projekt zu verwenden. Allerdings werden diese Daten als Validierungsdatsatz verwendet, so dass die Ergebnisse der entwickelten Modelle für 2010 und 2030 verglichen werden können.

## 2.2.4. Straßenverkehrszählungen

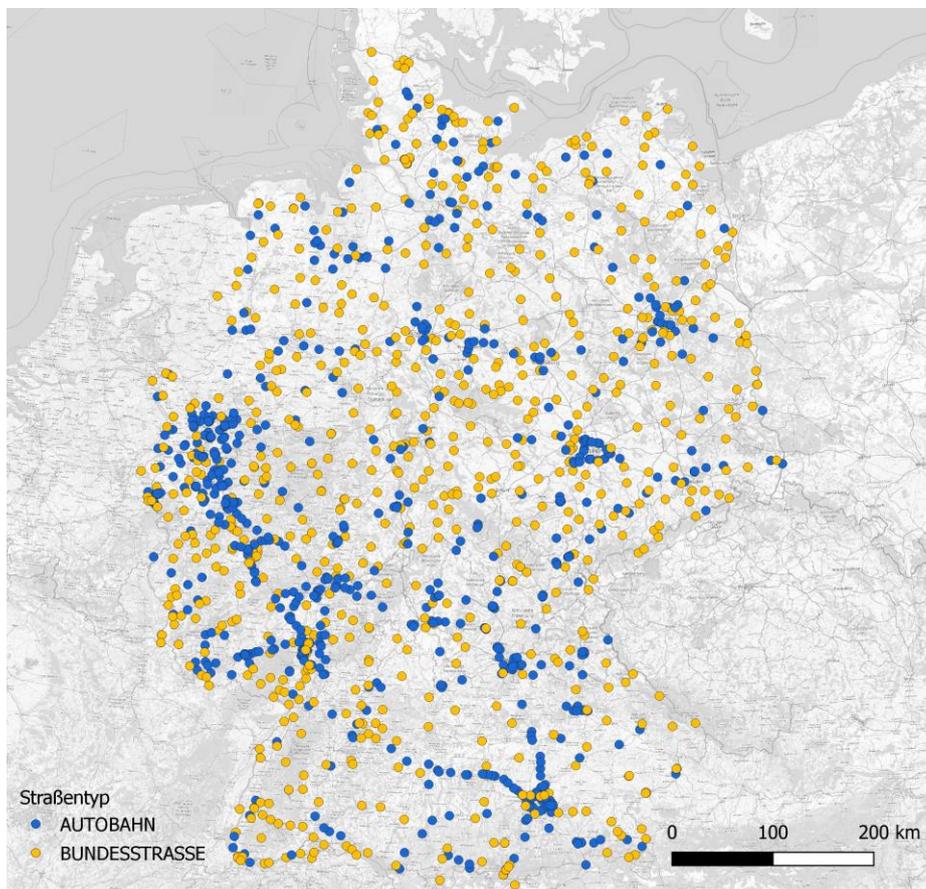
Die Daten der Straßenverkehrszählungen auf Autobahnen und Bundesstraßen wurden verwendet, unter anderem (siehe Abschnitte 3.2.5 und 3.3.6), um die Modelle zu kalibrieren und validieren. Diese Daten wurden von der Bundesanstalt für Straßenwesen heruntergeladen (BASt, 2011).

Der Datensatz enthält Stundenzählungen je Station, nach Fahrzeugart und Fahrtrichtung. Die Daten von 1.413 Zählstationen aus dem Jahr 2011 werden heruntergeladen und verarbeitet (Sie werden in [Bild 2-13](#) [Fehlertextquelle](#) [Kommentar](#) [finden](#) [werden](#) [Ereignisressourcen](#) [finden](#) [Ereignisressourcen](#) [finden](#) [Das](#) [werden](#)).

werden mit XY Koordinaten beschrieben und wurden so, so geographisch mit dem Straßennetzwerk verbunden. Für jede Station wurde eine entsprechende Kante des Netzwerkes identifiziert. In

bestimmten Fällen (z.B. Autobahnen, mit einer Fahrbahn pro Richtung) werden die zwei Fachrichtungen der Verkehrszählung getrennt identifiziert. Auf Bundesstraßen werden beide Richtungen zusammengefasst.

Nach der Zuordnung von Kanten und Zählstationen bleiben 902 Zählstationen für die Kalibrierung und Validierung des Modells. Die Gründe für den Unterschied sind entweder die nicht plausibel beobachtet Werte (z.B. Null-Werte) oder eine unmögliche oder unklare Identifikation der Kante des Netzwerkes (wie z.B. in der Nähe von Autobahnanschlussstellen).



**Bild 2-13. Straßenverkehrszählungen auf Autobahnen und Bundesstraßen in Deutschland (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)**

## 2.3. Straßen- und landgebundene öffentliche Verkehrs- und Luftverkehrsnetze

Es wurde ein multimodales Verkehrsnetz generiert, das als Input für die Simulationsmodelle dient. Die Netzwerke sind der wichtigste Input für Verkehrsmittelwahl- und Verkehrsumlegungsmodelle. Außerdem sind die Fahrtkosten auch wichtig für die Modelle.

### 2.3.1. Netzwerke

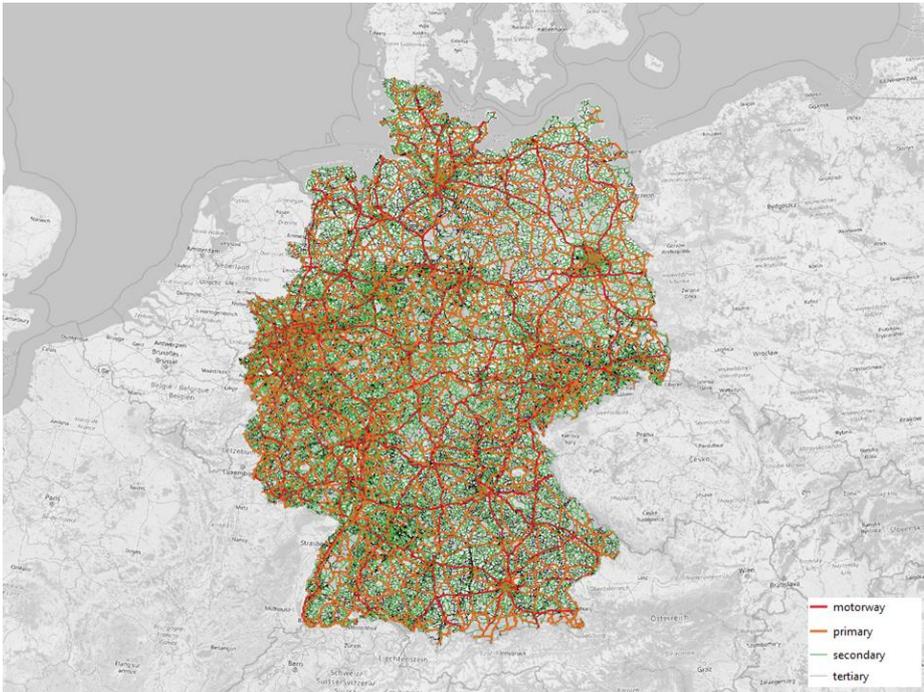
Das Netzwerk enthält die folgenden Elemente: Straßennetz, landgebundenes öffentliches Verkehrsnetz (beinhaltet öffentlichen Nahverkehr, Fernzüge und Fernbusse) und Luftverkehrsnetz. Auf der Grundlage dieser drei Elemente wurden Reisezeitmatrizen (Skim-Matrizen) für das Zonensystem der Modelle berechnet. Die folgenden Abschnitte beschreiben diese einzelnen Komponenten.

#### *Straßennetz*

Das Straßennetz umfasst sowohl Bundesfernstraßen in Deutschland als auch Autobahnen und Fernstraßen im übrigen Europa. Das Straßennetz wurde von OpenStreetMaps heruntergeladen. Innerhalb Deutschlands umfasst es die Straßen der Kategorien Autobahn, Fernverkehrsstraßen, Primär-, Sekundär- und Tertiärstraßen ([https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map\\_Features](https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_Features)) (siehe Bild 2-14). Außerhalb von Deutschland sind nur Autobahnen und Fernstraßen enthalten.

Jede Kante des Netzwerkes ist durch ihre Länge, Geschwindigkeitsbegrenzung, Anzahl der Fahrspuren und Kapazität gekennzeichnet. Diese Attribute werden aus den Attributen der OpenStreetMaps-Kartenmerkmale übernommen. In Ausnahmefällen, bei denen diese Attribute fehlen, werden Standardwerte verwendet.

Das Straßennetz wurde von OpenStreetMaps heruntergeladen und für die beiden in diesem Projekt verwendeten Modelle konvertiert.



**Bild 2-14. Straßennetz (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)**

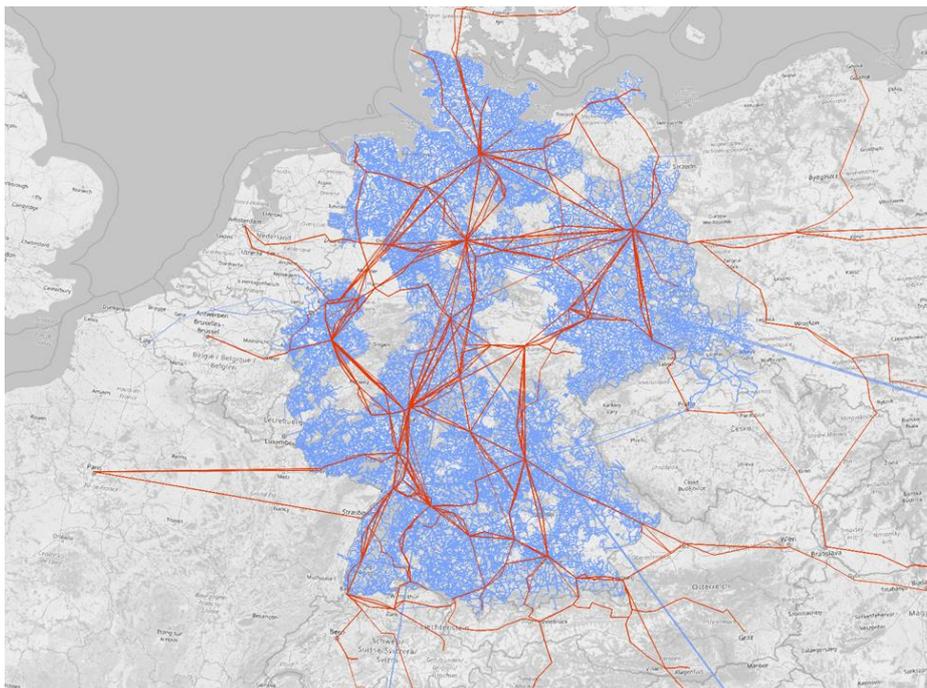
### *Landgebundenes öffentliches Verkehrsnetz*

GTFS-Daten (General Transit Feed Specification) wurden verwendet, um ein Netz für den landgebundenen öffentlichen Verkehr zu generieren. Neben dem öffentlichen Personennahverkehr gehören auch Fernzüge und Fernbusse in diese Kategorie, in welcher die internationalen Verbindungen auch erhältlich sind. Die GTFS-Daten sind ein standardisiertes Datenformat zur Speicherung von Informationen über Linien und Fahrpläne des öffentlichen Verkehrs.

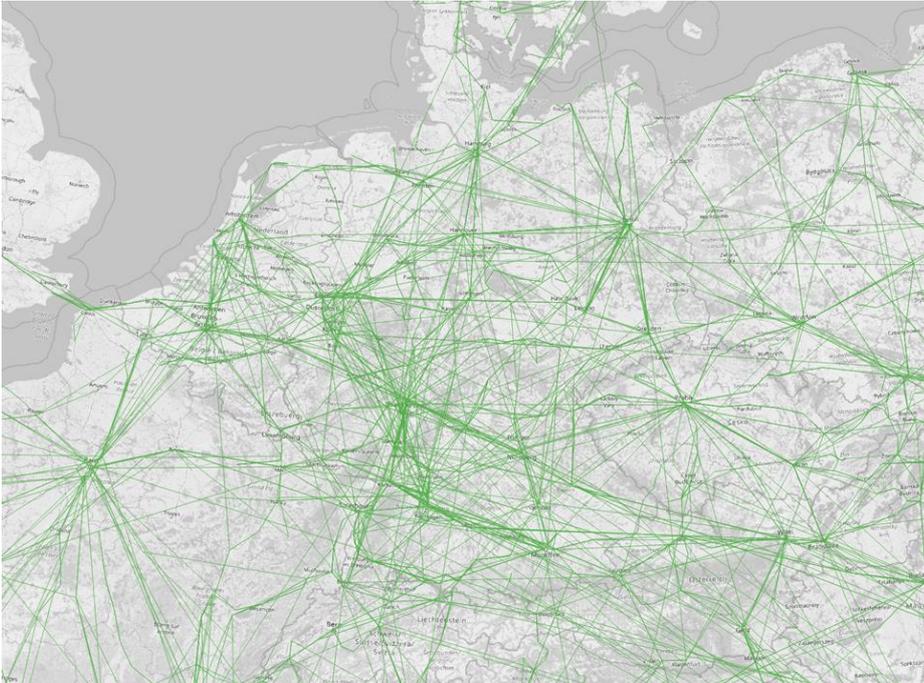
GTFS-Daten für den öffentlichen Verkehr wurden aus den folgenden Quellen bezogen:

- Fernverkehrszüge, Regionalzüge und S-Bahnen von gtfs.de (Bild 2-15)
- Straßenbahnen, U-Bahnen und Busse von gtfs.de. Da die Abdeckung der Daten von gtfs.de nicht vollständig war, wurden für die Gebiete, in denen keine Daten von gtfs.de vorhanden waren, zusätzliche Informationen von OpenStreetMaps heruntergeladen (Bild 2-15)

- FlixBus Buslinien von [transitfeeds.com/flixbus](https://transitfeeds.com/flixbus) (Bild 2-16)
- BlaBlaBus Linien von <https://api.idbus.com/#gtfs-file> (nicht dargestellt)



**Bild 2-15. Fernzüge- (rot) und ÖPNV-Netz (blau) (die Lücken in der Karte sind Orte, an denen GTFS nicht verfügbar war) (Quelle: gtfs.de, Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)**



**Bild 2-16. Fernbus-Netzwerk (FlixBus) (Quelle [transitfeeds.com/flixbus](https://transitfeeds.com/flixbus), Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)**

Die als GTFS gespeicherten Daten enthalten Haltestellenstandorte, Linien (in der Abfolge von Haltestellen) und Fahrten (einzelne Dienste jeder Linie an einem ausgewählten Tag). Diese Informationen stellen einen vollständigen ganztägigen Fahrplan des landgebundenen öffentlichen Verkehrs dar. Für die wenigen Gebiete, in denen keine GTFS-Daten vorhanden waren, wurden vereinfachte Fahrpläne generiert. Die vereinfachten Zeitpläne werden nachfolgendem Verfahren erstellt: herunterladen der OpenStreetMaps Haltestellen- und Liniendaten, Klassifizierung der Linien in Stadtbusse oder Regionalbusse, Definition von Betriebsbeginn und -ende, Takt und Fahrzeugkapazität pro Gruppe (nach vorhandenen GTFS-Daten) und Generierung von Abfahrten.

Die GTFS-Datenformate wurden in die Formate konvertiert, die von den beiden in diesem Projekt verwendeten Modellen akzeptiert werden.

### *Luftverkehrsnetz*

Luftverkehrsverbindungen wurden von Openflights <https://github.com/jpatokal/openflights> heruntergeladen. Der Service openflights enthält Flugverbindungen zwischen Flughäfen. Jede Verbindung wird durch Abflug- und Zielort, Fluggesellschaft und Flugzeugtyp beschrieben. Verbindungen, die nicht mit einem Direktflug abgedeckt werden, wurden in einem zweiten Schritt berechnet, indem die Route vom Ausgangs- zum Zielort über alle möglichen Umsteigepunkte berechnet wurde.

Es wurde jede Flugverbindung herausgefiltert, die entweder in Deutschland beginnt oder endet (siehe Bild 2-17). Der Drehkreuze in Berlin, Düsseldorf, Frankfurt, Hamburg und München zeigen sich deutlich. Der Anzahl der Flüge pro Tag an den meistfrequentierten Flughäfen in Deutschland wurden auf der Grundlage der Daten von flightradar24.com Flughäufigkeiten zugeordnet. So konnten die Reisezeiten zwischen Flughäfen berechnet werden. Mit dieser Reisezeitmatrix von Flughafen zu Flughafen und den Daten des MIVs und ÖVs wird später eine Reisezeitmatrix von jedem Ausgangspunkt zu jedem Ziel (einschließlich Zubringerverkehr zum/vom Flughafen) berechnet. Die Flughafenauswahl erfolgt durch die Minimierung der Gesamtreisezeit.



*Bild 2-17. Flugrouten von/zu deutschen Flughäfen (Quelle: [openflights.org](https://openflights.org), Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)*

### 2.3.2. Fahrtkostenberechnung

Neben der Reisezeit und der Reisedistanz, die aus dem Netzwerk und dem Fahrplan ermittelt werden können, sind die Reisekosten ein weiterer wichtiger Faktor, der das Reiseverhalten der Menschen beeinflusst, insbesondere bei der Wahl des Verkehrsmittels. In diesem Unterabschnitt wurden die Reisekosten für vier Modi für Fernreise berechnet: Auto, Zug, Fernbus und Flugzeug.

Die Reisekosten für das Auto entsprechen 0,08 €/Kilometer. Für den Pkw-Verkehr werden in der Praxis die Pkw-Betriebskosten als Merkmal verwendet. Diese werden im Allgemeinen als die Betriebskosten definiert, die zu einem großen Teil aus den Benzinkosten bestehen. Unter Berücksichtigung des Benzinpreises und der durchschnittlichen Kraftstoffeffizienz können wir auf durchschnittliche Betriebskosten von 0,08 €/km schließen. Victoria Transport Policy Institute Victoria Transport Policy Institute (2017) gibt einen Durchschnittswert von 0,1637 \$/mi an, was 0,1017 \$/km entspricht, ebenfalls in der gleichen Größenordnung. Für die anderen Verkehrsmittel wurde die Technik des Web-Crawling angewandt, um die Einheitskosten zu erhalten, da ein solcher Wert nach unserem besten Wissen nicht existiert. Um die Preisinformationen aus dem Internet zu crawlen, wählten wir die Websites von Skyscanner (<https://www.skyscanner.de/>) für Flugreisen, Deutsche Bahn (<https://www.bahn.de/>) für Bahnreisen und Flixbus (<https://global.flixbus.com/>) für Fernbusreisen.

Die Preisdaten wurden im November und Dezember 2020 gesammelt. Es wurden 59 inländische und internationale Verbindungen für den Flug, 73 inländische Verbindungen für die Bahn und, 50 inländische Verbindungen für den Fernbus ausgewählt. Danach wurden die Einheitskosten pro Kilometer für jeden Verkehrsträger berechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 2-18, Bild 2-19 und Bild 2-20 dargestellt. Für die spätere Anwendung wurde eine Trendlinienanalyse angewandt, um die Regressionsfunktion für die Preise nach Verkehrsträgern zu schätzen, die Funktionen sind ebenfalls in den Abbildungen zu finden. Generell gilt, dass die Kosten pro Kilometer mit zunehmender Entfernung abnehmen. Zu beachten ist, dass der Preis für den Zug einen Sparpreis und einen Flexpreis hat. In diesem Projekt nehmen wir den Durchschnittswert dieser beiden Preise.

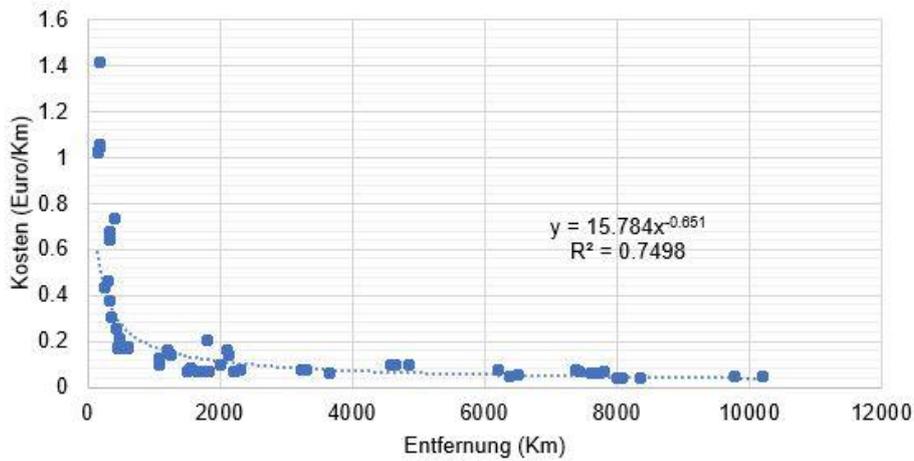


Bild 2-18. Kosten pro Kilometer von Luftverkehr

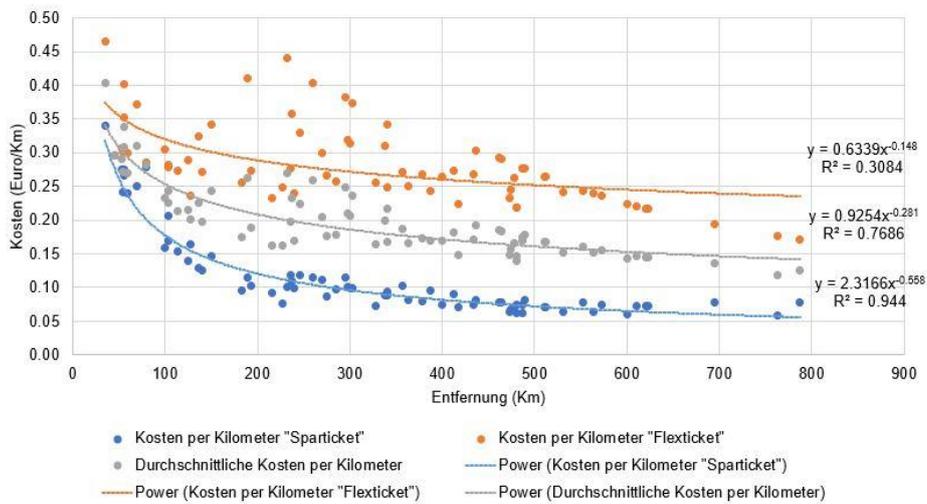


Bild 2-19. Kosten pro Kilometer von Fernzug

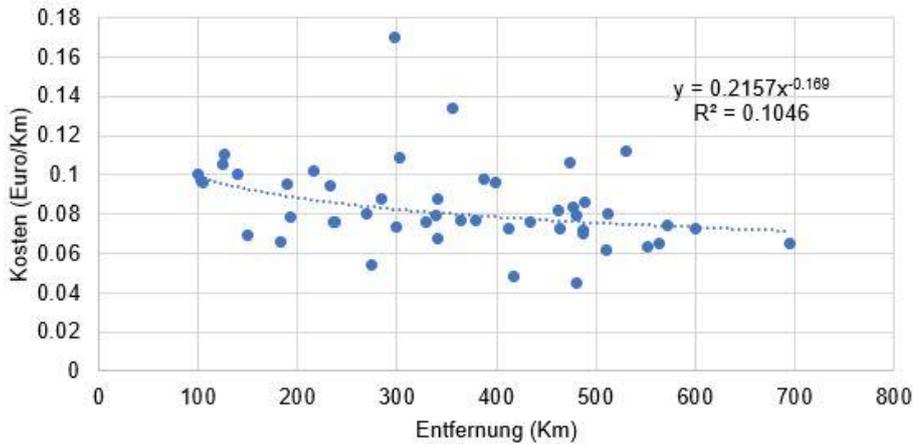


Bild 2-20. Kosten pro Kilometer von Fernbus

### 2.3.3. Reisezeitmatrizen

Reisezeitmatrizen beschreiben die Reisezeit nach Verkehrsträger von jedem Ausgangspunkt zu jedem Ziel. Die Berechnung basiert auf der Routenwahl eines Weges von jedem Ausgangspunkt zu jedem Ziel. So konnten Matrizen für Reisedistanzen, Frequenzen, Anzahl der Transfers und Kosten berechnet werden.

Die Skim-Matrizen (Reisezeitmatrizen) für Auto, Zug und Fernbus wurden mit Hilfe des von der Schweizerische Bundesbahnen (SSB) entwickelten Skim-Rechners berechnet. Dieser Rechner generierte mehrere zufällige Punkte in jeder Zone, berechnet dann die Routen zwischen allen Punkten in allen Zonen und wertet die durchschnittlichen Werten aus. Bei der Berechnung der Fahrzeit und der Fahrstrecke wurden für die verschiedenen Verkehrsträger unterschiedliche Angaben berücksichtigt. Das Auto wurde von Tür zu Tür ohne Zubringer und Abbringerweg berechnet; für andere Verkehrsträger müssen jedoch Umstieg, Zubringer und Abbringerweg berücksichtigt werden. Dies kann aus den GTFS-Fahrplänen entnommen werden. Für den ÖPNV wurden Zu-Fuß-Gehen und Radfahren als Zubringer und Abbringer berücksichtigt. Für den Fernbus und Fernzüge wurde ÖPNV als erste und letzte Meile berücksichtigt.

Die Skim-Matrizen für Luft wurden separat behandelt, da es keine GTFS-Daten für den Luftmodus gibt. Die Flugzeiten werden aus openflights ermittelt (4.476 Flüge an einem Tag im Januar 2020).

Zunächst haben wir jede Zone dem nächstgelegenen Flughafen durch Autoskims zugeordnet. Danach berechnen wir die Reisezeit zwischen den Flughäfen. Für die Flughäfen mit Direktverbindungen haben wir die Flugdistanz und -zeit auf Basis einer Durchschnittsgeschwindigkeit berechnet. Für die Verbindungen, für die es keine Direktverbindungen gibt, haben wir mögliche Routen mit Umstieg berechnet. Dann haben wir die geringste Flugzeit inklusive Umsteigezeit ausgewählt. Außerdem wird der Umsteigeflughafen gespeichert. Für jedes Ziel (alle mit Ausnahme der Zone "extern zu extern") haben wir die Flugzeit(en) aus dem/den vorherigen Skim(s) kopiert, unter Berücksichtigung der Flughäfen, die mit der Herkunftszone und der Zielzone verbunden sind. Die Umsteigezeit hängt vom Flughafen ab, große Flughäfen, wie FRA, sollten eine kürzere Umsteigezeit haben. Für die Zu- und Abfahrtszeit addieren wir die Auto-Skim-Zeit zwischen der Ursprungszone und der Zone des ersten Flughafens für die Zufahrt und die Fahrzeit zwischen der Zone des letzten Flughafens und der Zielzone für die Abfahrt.

Zum Schluss wurden die Reisekosten näherungsweise durch den Preis pro Kilometer für jeden Verkehrsträger multipliziert mit der zurückgelegten Entfernung bestimmt.

Als Beispiel für Reisezeitmatrizen zeigt die Bild 2-21 die Reisezeit von dem Münchner Hauptbahnhof in das übrige Bundesgebiet. Die Bild stellt dar, dass die meisten Zonen innerhalb von 10 Stunden Fahrtzeit mit dem Auto erreichbar sind. Die Bahn hat ebenfalls eine gleichwertige Leistung, aber einige Gebiete benötigen mehr als 10 Stunden. Die Reisezeit mit dem Fernbus nimmt mit zunehmender Entfernung deutlicher zu als mit dem Auto und der Bahn, dies ist in grauen Bereichen vor allem im nördlichen Teil Deutschlands erkennbar. Was den Flugverkehr betrifft, so haben die Flughäfen in Deutschland ihr eigenes Einzugsgebiet und im Einzugsgebiet von München ist es unmöglich, mit dem Flugzeug zu reisen, aber insgesamt hat der Flugverkehr eine relativ kurze Reisezeit.

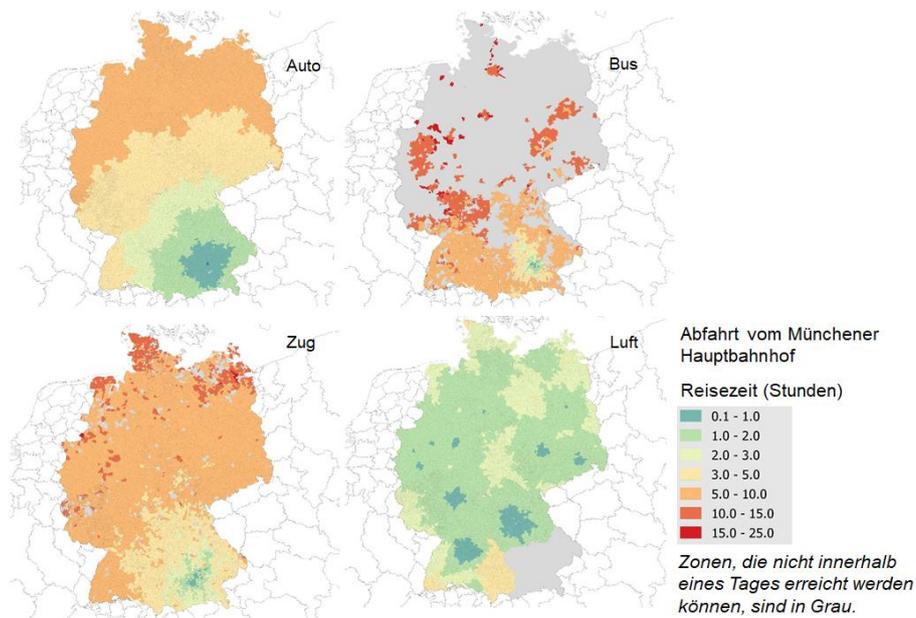


Bild 2-21. Reisezeiten in Stunden von Münchener Hauptbahnhof nach Verkehrsmittel

### 3. Daten und Methoden

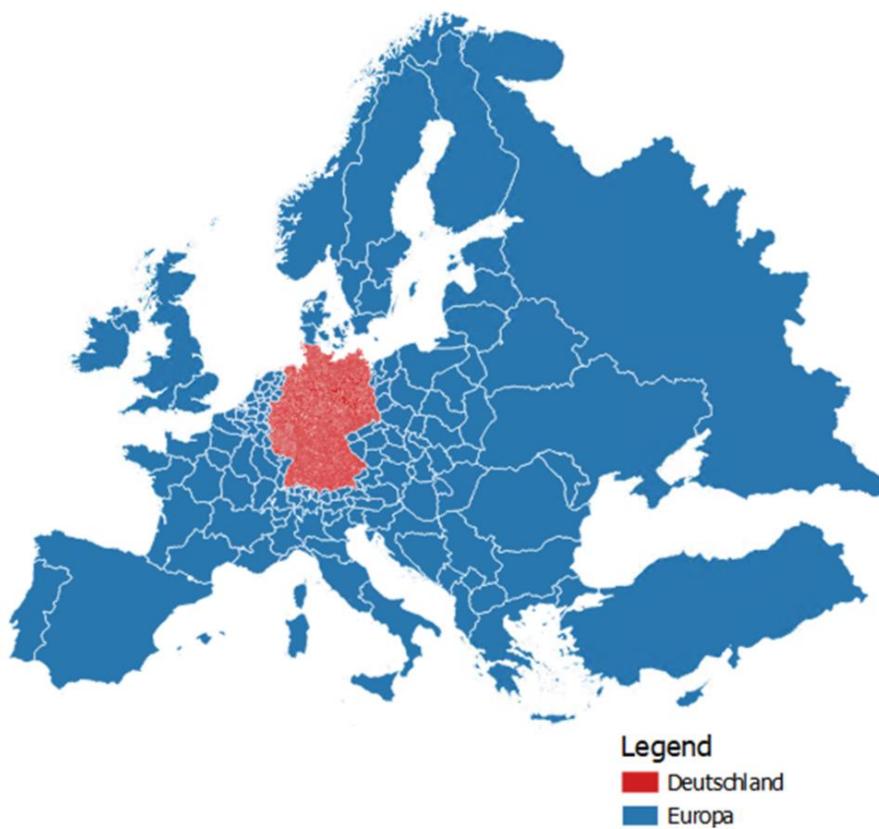
#### 3.1. Eingabedaten

Die für dieses Modell verwendeten verkehrsbezogenen Daten wurden bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben. Das Modell wird mit Hilfe von Daten der Mobilität in Deutschland entwickelt (sowohl für Modellschätzung als auch für die Kalibrierung). Die Straßenverkehrszählungen und Prognosedaten werden zu der Validierung und Plausibilitätsprüfung verwendet. In diesem Abschnitt wird die Verwendung zusätzlicher Datenquellen für das Zonensystem, die Bevölkerung und den Netzausbau in Jahr 2030 beschrieben.

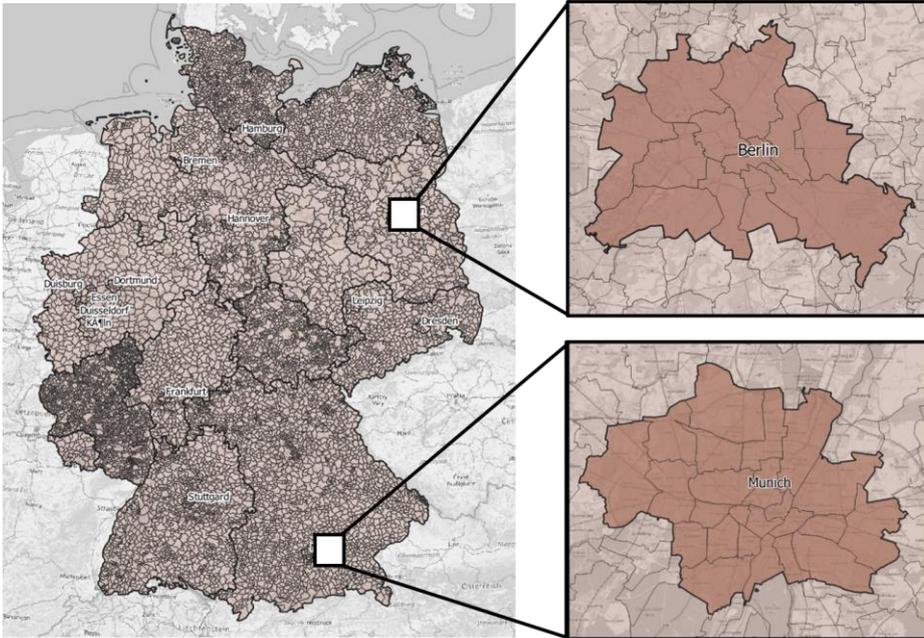
##### 3.1.1. Zonensystem

In diesem Projekt wurden insgesamt 11.869 Verkehrszonen definiert (Bild 3-1, Bild 3-4, Bild 3-4), von denen 11.717 in Deutschland, 147 in Europa und 5 im Übersee liegen. Die Größe der Zonen ist variabel und reicht, von kleinen Gemeinden in Deutschland und den Stadtbezirken der 14 größten Städte, über die

Kantone in der Schweiz oder den Provinzen in Frankreich, bis zu großen Zonen, die ein ganzes Land abdecken, wie zum Beispiel Spanien oder Griechenland. In Deutschland wurden überwiegend Gemeindegrenzen als Zonen genutzt. Zusätzlich wurden die 14 Großstädte Berlin, Bremen, Dortmund, Dresden, Duisburg, Düsseldorf, Essen, Frankfurt, Hamburg, Hannover, Köln, Leipzig, München und Stuttgart weiter nach Bezirken unterteilt. Die folgende Bild zeigt das gesamte Untersuchungsgebiet mit seinem Zonensystem sowie Berlin und München auf Bezirksebene ([Bild 3-2](#) [Bild 3-2](#) [Bild 3-2](#)).



**Bild 3-1. Internes und externes Zonensystem (Zonen in Übersee sind nicht dargestellt). (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)**



**Bild 3-2. Zonensystem des Untersuchungsgebiets in Deutschland (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)**

### 3.1.2. Synthetische Bevölkerung

#### *Synthetische Bevölkerung für das Basisjahr 2011*

Neben Netzwerk und Zonensystem gehört auch die Bevölkerung in Deutschland zu unserem Modell-Input. Da es in der Praxis aus Datenschutzgründen nicht möglich ist, eine reale Bevölkerung zu erstellen, wurde eine synthetische Bevölkerung (SB) generiert, die die Gesamtbevölkerung in Deutschland repräsentiert. Die synthetische Bevölkerung besteht aus drei Bereichen, nämlich Personen, Haushalten und Wohnungen. Jeder Bereich hat unterschiedliche Attribute, wie in Tabelle 3-1 dargestellt.

Bereich	Attribute
Personen	Alter, Geschlecht, Beschäftigungsstatus, Berufstyp, Führerscheinbesitz, Einkommen
Haushalte	Haushaltsgröße, Autobesitz
Wohnungen	Koordinaten

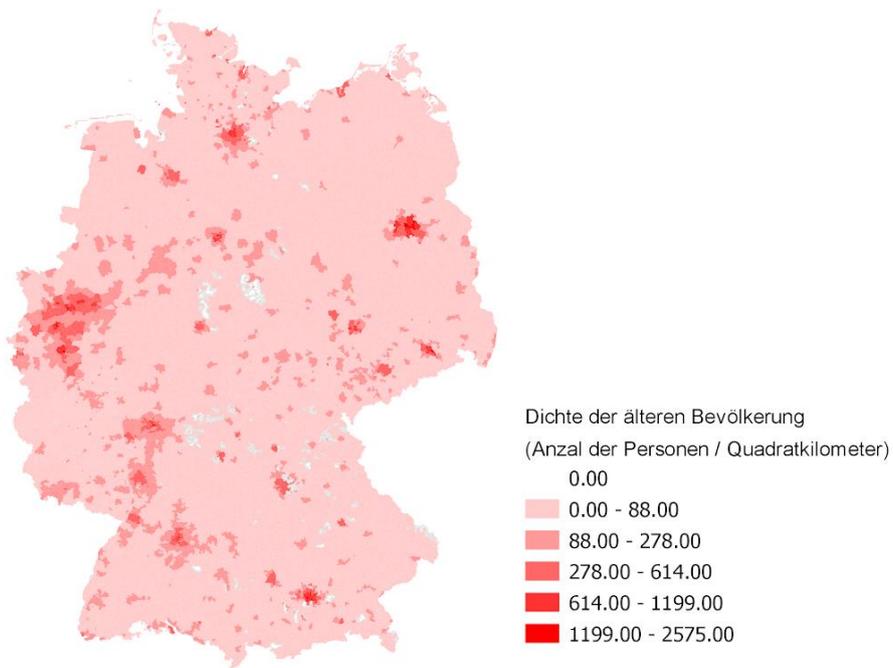
**Table 3-1. Synthetic Population - Attributes**

The synthetic population was created using the Iterative Proportional Updating (IPU) method. This method adjusts a disaggregated sample of individuals to aggregated marginal conditions. The disaggregated individual sample is based on data from the microcensus of 2011. The aggregated marginal conditions are socio-economic data (SD) from a database of the Federal Statistical Office. The result of the synthetic population generation is summarized in Table 3-2. The errors in the total population and the number of households are below 5%, indicating a good fit of the synthetic population for traffic models.

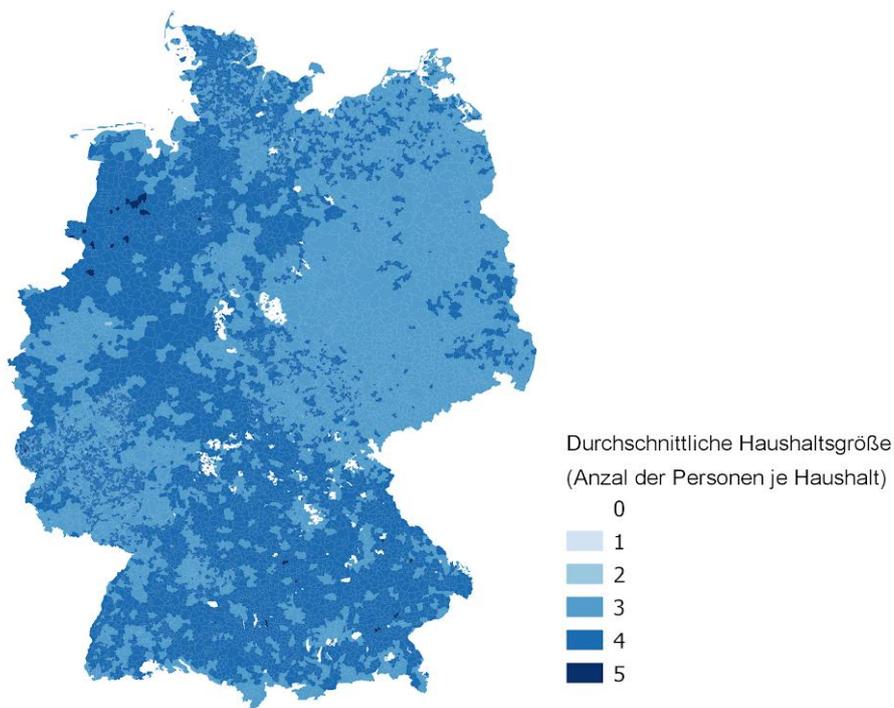
Bundesland	Bevölkerung			Haushalte		
	synthetische Bevölkerung (Mio.)	sozioökonomischen Daten aus Zensus (Mio.)	Fehler (%)	synthetische Bevölkerung (Mio.)	sozioökonomischen Daten aus Zensus (Mio.)	Fehler (%)
Schleswig-Holstein	2.820	2.800	0.74%	1.315	1.316	-0.10%
Hamburg	1.696	1.7067	-0.61%	0.877	0.877	0.00%
Niedersachsen	7.820	7.778	0.54%	3.526	3.518	0.23%
Bremen	0.552	0.543	1.79%	0.304	0.294	3.19%
Nordrhein-Westfalen	17.629	17.538	0.52%	8.214	8.131	1.02%
Hessen	6.042	5.972	1.18%	2.774	2.751	0.82%
Rheinland-Pfalz	4.008	3.990	0.48%	1.789	1.789	0.00%
Baden-Württemberg	10.556	10.487	0.67%	4.709	4.709	0.00%
Bayern	12.577	12.398	1.45%	5.680	5.680	0.00%
Saarland	0.999	0.999	-0.01%	0.460	0.460	0.00%
Berlin	3.449	3.292	4.75%	1.868	1.795	4.09%
Brandenburg	2.468	2.456	0.52%	1.182	1.182	0.00%
Mecklenburg-Vorpommern	1.633	1.610	1.45%	0.803	0.803	0.00%
Sachsen	4.097	4.057	0.99%	2.068	2.048	0.94%
Sachsen-Anhalt	2.284	2.287	-0.14%	1.127	1.127	0.00%
Thüringen	2.209	2.189	0.92%	1.054	1.054	0.00%

**Tabelle 3-2. Ergebnis der synthetischen Bevölkerungsgenerierung**

Die synthetische Bevölkerung ermöglicht detaillierte Analysen von Personen und Haushalten in dem disaggregierten Nachfragemodell. Bild 3-3 und Bild 3-4 zeigen Beispiele von Personen- und Haushaltsattributen in Deutschland.



**Bild 3-3. Bevölkerungsdichte der älteren Menschen (älter als 65 Jahre alt) (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)**



**Bild 3-4. Durchschnittliche Haushaltsgröße. (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)**

### *Synthetische Bevölkerung für das Jahr 2030*

Nach der Erstellung der synthetischen Bevölkerung von 2011 haben wir die Bevölkerung und die Haushalte im Jahr 2030 anhand der von jedem Bundesland veröffentlichten Prognosedaten ermittelt. Die Eingangsdaten für diese Analyse sind:

- Haushalte und Personen aus den Daten des Mikrozensus
- Haushaltsgewichte aus der Optimierungsphase für die synthetische Bevölkerung 2011
- Bevölkerungsprognose nach Landkreisen, veröffentlicht von den einzelnen Bundesländern  
([Tabelle 3-3](#)~~Tabelle 3-3~~~~Tabelle 3-3~~)

Konkret haben wir die in der Optimierungsphase der Bevölkerungssynthese berechneten Gewichte beibehalten und die Gesamtzahl der Ziehungen in der Zuteilungsphase durch die prognostizierte Bevölkerung ersetzt. Die wichtigsten Annahmen dieses Ansatzes sind:

- Die Verteilungen von Alter, Geschlecht, Erwerbsstatus und Haushaltsgröße bleiben von 2011 bis 2030 konstant, da keine weiteren Daten vorliegen.
- Die Haushaltseinheiten (Haushalt und Haushaltsmitglieder) ändern sich von 2011 bis 2030 nicht wesentlich.
- Die Bevölkerungswachstumsrate ist für alle Gemeinden innerhalb eines Landkreises gleich.

State	Quelle
Brandenburg	<a href="https://lbv.brandenburg.de/dateien/stadt_wohnen/RB_BVS_2017_BIS_2030.pdf">https://lbv.brandenburg.de/dateien/stadt_wohnen/RB_BVS_2017_BIS_2030.pdf</a>
Berlin	<a href="https://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/bevoelkerungsprognose/download/2018-2030/Bericht_Bevprog2018-2030.pdf">https://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/bevoelkerungsprognose/download/2018-2030/Bericht_Bevprog2018-2030.pdf</a>
Mecklenburg-Vorpommern	<a href="https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/em/Raumordnung/Bevoelkerungsprognose">https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/em/Raumordnung/Bevoelkerungsprognose</a>
Baden-Württemberg	<a href="https://www.statistik-bw.de/Service/Veroeff/Monatshefte/PDF/Beitrag10_04_01.pdf">https://www.statistik-bw.de/Service/Veroeff/Monatshefte/PDF/Beitrag10_04_01.pdf</a>
Bavaria	<a href="https://www.statistik.bayern.de/mam/statistik/gebiet_bevoelkerung/demographischer_wandel/demographische_profile/09171.pdf">https://www.statistik.bayern.de/mam/statistik/gebiet_bevoelkerung/demographischer_wandel/demographische_profile/09171.pdf</a>
Saarland	<a href="https://www.saarland.de/SharedDocs/Downloads/DE/LAS_Formulare/bedarfsberechnung_landarztquote.pdf?__blob=publicationFile&amp;v=3">https://www.saarland.de/SharedDocs/Downloads/DE/LAS_Formulare/bedarfsberechnung_landarztquote.pdf?__blob=publicationFile&amp;v=3</a>
Rheinland-Pfalz	<a href="https://www.statistik.rlp.de/fileadmin/dokumente/stat_analysen/RP_2070/Demografischer_Wandel.pdf">https://www.statistik.rlp.de/fileadmin/dokumente/stat_analysen/RP_2070/Demografischer_Wandel.pdf</a>
Sachsen	<a href="https://www.bevoelkerungsmonitor.sachsen.de/download/RBV%20VWG%20VWV/rbv_verwaltungsgemeinschaft_altenberg.pdf">https://www.bevoelkerungsmonitor.sachsen.de/download/RBV%20VWG%20VWV/rbv_verwaltungsgemeinschaft_altenberg.pdf</a>
Schleswig-Holstein	<a href="https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/D/demografie/downloads/einwohnerentwicklung_sh_gesamt.pdf?__blob=publicationFile&amp;v=1">https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/D/demografie/downloads/einwohnerentwicklung_sh_gesamt.pdf?__blob=publicationFile&amp;v=1</a>
Sachsen-Anhalt	<a href="https://statistik.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Landesaeamter/StaLa/startseite/Themen/Bevoelkerung/Tabellen/Bevoelkerungsprognose/6_-Bevoelkerungsprognose-2014-2030-Gemeinden.pdf">https://statistik.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Landesaeamter/StaLa/startseite/Themen/Bevoelkerung/Tabellen/Bevoelkerungsprognose/6_-Bevoelkerungsprognose-2014-2030-Gemeinden.pdf</a>
Hessen	<a href="https://statistik.hessen.de/press/pressarchiv/pm_2245.html">https://statistik.hessen.de/press/pressarchiv/pm_2245.html</a>
Niedersachsen	<a href="https://www.statistik.niedersachsen.de/startseite/themen/bevolkerung/themenbereich-bevoelkerung-tabellen-87673.html">https://www.statistik.niedersachsen.de/startseite/themen/bevolkerung/themenbereich-bevoelkerung-tabellen-87673.html</a>
NRW	<a href="https://www.landesdatenbank.nrw.de/dbnrw/online?operation=abrufabelleBearbeiten&amp;levelindex=2&amp;levelid=1611596848057&amp;auswahloperation=abrufabelleAuspraegungAuswaehlen&amp;auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&amp;auswahlziel=werteabruf&amp;code=12421-01i&amp;auswahltext=&amp;werteabruf=Werteabruf#abreadcrumb">https://www.landesdatenbank.nrw.de/dbnrw/online?operation=abrufabelleBearbeiten&amp;levelindex=2&amp;levelid=1611596848057&amp;auswahloperation=abrufabelleAuspraegungAuswaehlen&amp;auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&amp;auswahlziel=werteabruf&amp;code=12421-01i&amp;auswahltext=&amp;werteabruf=Werteabruf#abreadcrumb</a>
Bremen	<a href="https://www.statistik.bremen.de/themen/bevoelkerung__gebiet-1853">https://www.statistik.bremen.de/themen/bevoelkerung__gebiet-1853</a>
Hamburg	<a href="https://www.statistik-nord.de/zahlen-fakten/bevoelkerung/bevoelkerungsstand-und-entwicklung">https://www.statistik-nord.de/zahlen-fakten/bevoelkerung/bevoelkerungsstand-und-entwicklung</a>
Thüringen	<a href="https://statistik.thueringen.de/datenbank/TabAnzeige.asp?tabelle=kz000121%7C%7C">https://statistik.thueringen.de/datenbank/TabAnzeige.asp?tabelle=kz000121%7C%7C</a>

**Table 3-3. Quellen der amtlichen Bevölkerungsprognose nach Bundesländern**

In einem ersten Schritt haben wir die Gesamtbevölkerung nach Gemeinden im Jahr 2030 berechnet. Die Eingabedaten für diese Analyse sind die Bevölkerungsprognose nach Landkreisen (Tabelle 3-3). Da die Daten aus unterschiedlichen Quellen stammten, variierten sowohl das Basis- als auch das Endjahr zwischen den Bezirken. So reichten die Basisjahre von 2010 bis 2018, und die Endjahre waren 2030 oder 2040. Um die Auswirkungen der Unstimmigkeiten zwischen den Jahren zu beseitigen, haben wir die geometrischen Bevölkerungswachstumsraten für jeden Bezirk berechnet. Die geometrische Bevölkerungswachstumsrate wurde mit Gleichung G1 berechnet.

$$r = \left( \frac{B_{t_2}}{B_{t_1}} \right)^{1/(t_2-t_1)} - 1 \quad \text{G1}$$

wobei:

- $r$  ist die Wachstumsrate der Bevölkerung
- $B_{t_2}$  ist die Bevölkerung im Prognosejahr
- $B_{t_1}$  ist die Bevölkerung im Basisjahr
- $t_2$  ist das Prognosejahr
- $t_1$  ist das Basisjahr

Anschließend haben wir die Rate auf unsere spezifischen Prognosejahre von 2011 bis 2030 angewandt, um die Bevölkerung im Jahr 2030 auf der Grundlage der Bevölkerung im Jahr 2011 nach Gemeinden zu erhalten (Gleichung G2).

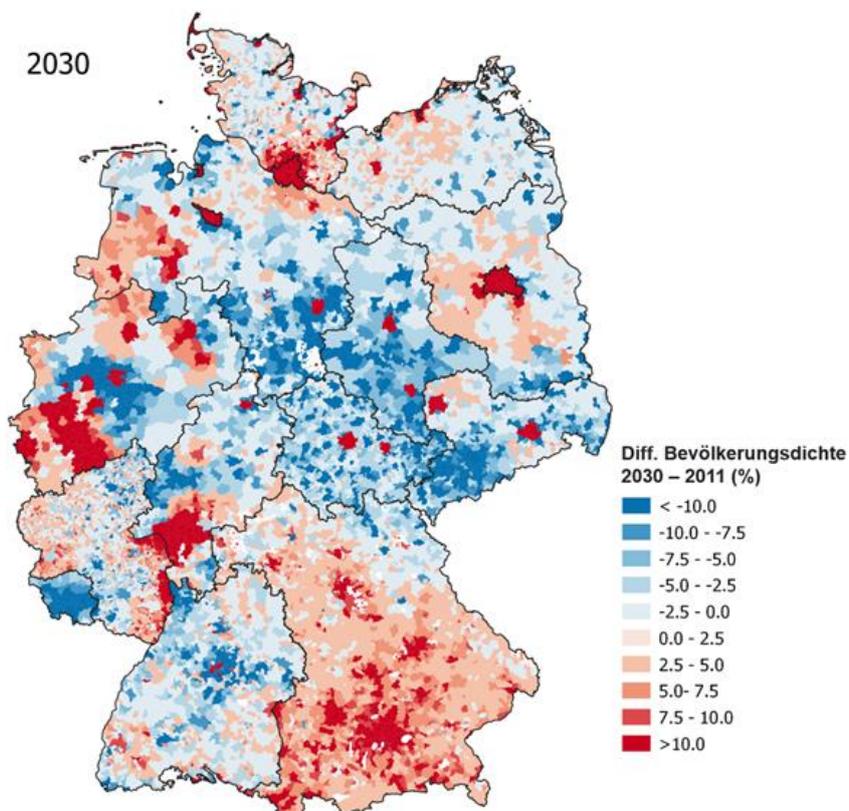
$$B_{2030} = B_{2011} \cdot (1 + r)^{(2030-2011)} \quad \text{G2}$$

wobei:

- $B_{2030}$  ist die Bevölkerung im Jahr 2030
- $B_{2011}$  ist die Bevölkerung im Jahr 2011
- Alle anderen Variablen wie zuvor beschrieben

Bild 3-5 zeigt den relativen Unterschied in der Bevölkerungsdichte zwischen 2011 und 2030. Die amtlichen Bevölkerungsprognosen deuten auf einen Anstieg der Bevölkerung in den Großstädten und in ganz Bayern hin, während die Bevölkerung in den ländlichen Gebieten zurückgeht. Wir können auch einige Unstimmigkeiten in Gemeinden in der Nähe der Grenze einiger Bundesländer

beobachten, da ein Bundesland einen allgemeinen Bevölkerungsanstieg prognostiziert, während das andere Bundesland einen Bevölkerungsrückgang voraussagt. Einige Beispiele sind Bayern und Baden-Württemberg oder Brandenburg und Sachsen-Anhalt.



*Bild 3-5. Relativer Differenz in der Bevölkerungsdichte zwischen 2011 und 2030. (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)*

Anschließend haben wir die Bevölkerung nach Gemeinden verwendet, um die Haushalte und Personen für 2030 zu generieren. Da die ursprüngliche Berechnung mit Haushalten als Kontrollsumme arbeitet, änderten wir den Code, um so viele Ziehungen wie nötig zu ermöglichen, bis die Bevölkerung der prognostizierten Bevölkerung entsprach. Die Gesamtbevölkerung und die Haushalte nach Bundesländern sind in Tabelle 3-4 zusammengefasst.

Bundesland	Bevölkerung 2011	Bevölkerung 2030	Haushalte 2011	Haushalte 2030
Schleswig-Holstein	2.820.804	2,867,803	1.314.965	1,458,896
Hamburg	1.696.219	1,889,172	876.500	977,202
Niedersachsen	7.820.010	7,369,077	3.526.042	3,701,362
Bremen	552.418	684,133	303.779	372,556
Nordrhein-Westfalen	17.629.642	17,956,619	8.214.067	9,005,795
Hessen	6.042.272	6,085,136	2.773.643	3,064,724
Rheinland-Pfalz	4.008.859	3,983,297	1.789.030	1,985,456
Baden-Württemberg	10.556.710	10,778,929	4.709.228	5,202,191
Bayern	12.577.939	12,941,723	5.679.507	6,387,431
Saarland	999.568	915,169	459.853	468,452
Berlin	3.448.649	3,711,874	1.868.397	2,010,781
Brandenburg	2.468.446	2,401,338	1.182.470	1,220,231
Mecklenburg-Vorpommern	1.633.336	1,563,693	803.002	802,278
Sachsen	4.097.116	3,956,480	2.067.802	2,104,648
Sachsen-Anhalt	2.283.895	1,986,585	1.127.332	1,024,184
Thüringen	2.208.679	1,956,972	1.053.817	1,006,291

**Tabelle 3-4. Bevölkerung und Haushalt in 2011 und 2030**

Nachdem Haushalte, Personen und Arbeitsplätze generiert wurden, haben wir die Arbeitsplätze den Arbeitnehmern zugeordnet. Dabei wurde derselbe Ansatz wie bei der synthetischen Bevölkerung von 2011 verwendet. Bild 3-6 zeigt die kumulative Verteilung der Pendeldistanz nach Teilpopulationen. Wie beobachtet, entspricht sie der Verteilung der Pendeldistanz der MiD 2017.

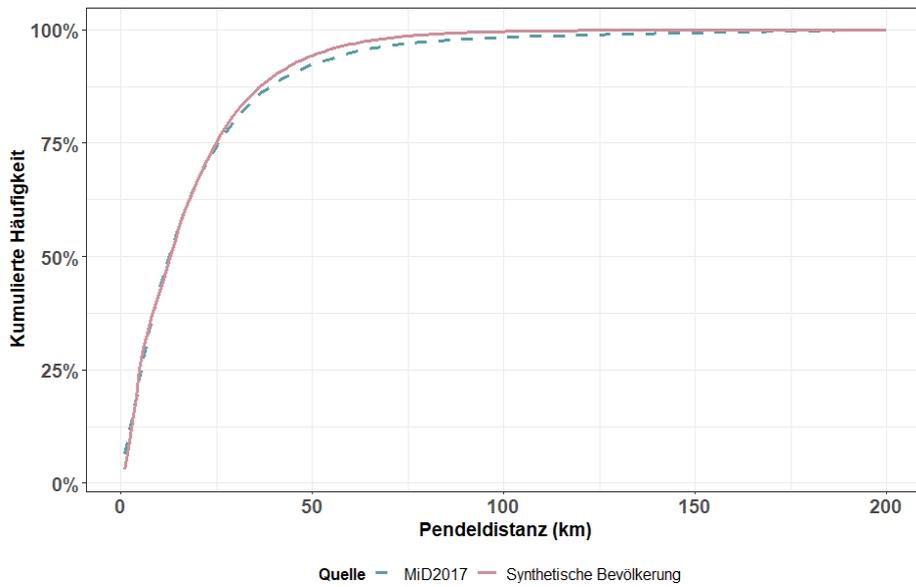


Bild 3-6. Verteilung der Pendeldistanz

### 3.1.3. Implementierung der Infrastrukturmaßnahmen für das Szenario 2030

#### Auswahl der Infrastrukturmaßnahmen

Als Informationsgrundlage für den Straßenbestand im Jahr 2030 wurde der Bundesverkehrswegeplan 2030 genutzt. Dieser berücksichtigt 2000 Projektvorschläge im Bereich der Infrastrukturplanung. Eine Übersicht aller Straßenbauprojekte beinhaltet Bild 3-7.

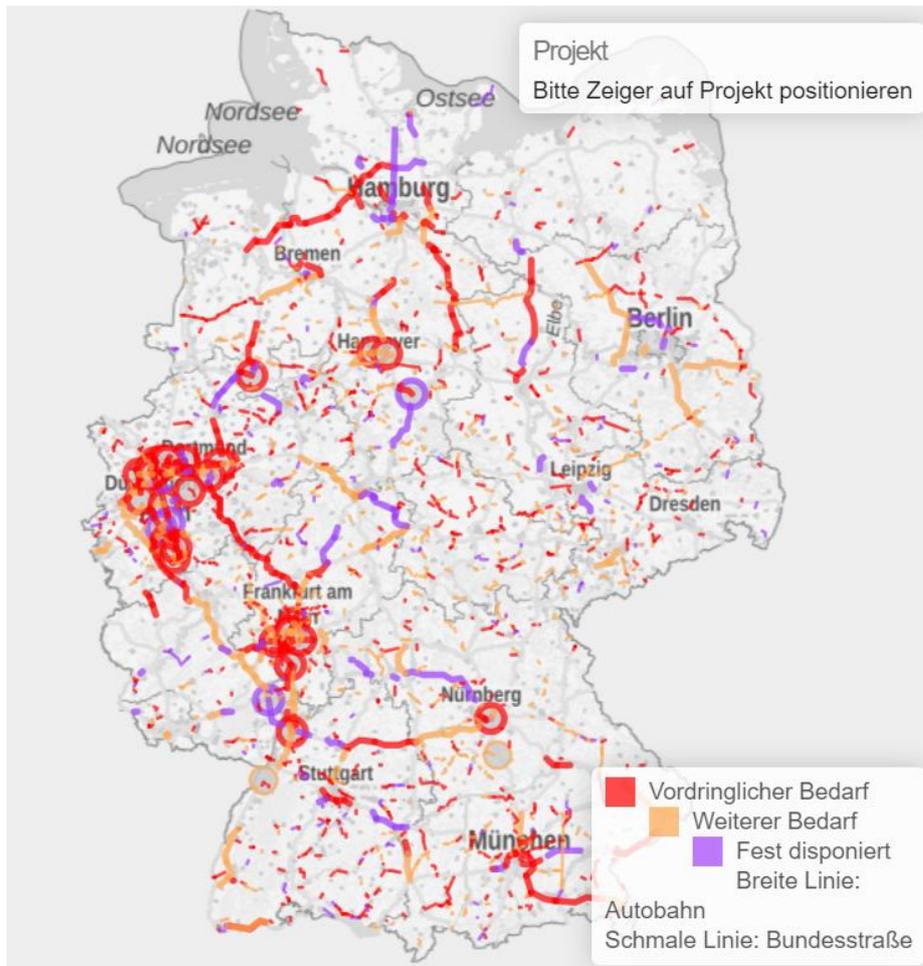


Bild 3-7. Übersicht der Straßenprojekte im Bundesverkehrswegeplan 2030 (Quelle [https://www.bvwp-projekte.de/map\\_street.html](https://www.bvwp-projekte.de/map_street.html))

Die Auswahl der zu berücksichtigenden Straßenprojekte für dieses Modell läuft in zwei Stufen ab. Zunächst wird der jeweilige Planungsstand berücksichtigt. Die unterschiedlichen Planungsstände sind in 18 Stufen unterteilt (Tabelle 3-5). In diesem Modell werden für das Szenario 2030 nur die Bauvorhaben berücksichtigt, die bereits einen ergangenen Planfeststellungsbeschluss vorweisen

können. Dies entspricht der Stufe 15. Die übrigen Projekte befinden sich noch in früheren Planungsphasen und können keine Fertigstellung bis zum Jahr 2030 garantieren.

Planungsstand:		Folge
OP	ohne Planungsbeginn	1
VE	Vorentwurf in Bearbeitung	2
VEA	Vorentwurf abgeschlossen	3
VEG	Vorentwurf genehmigt	4
VP	Vorplanung läuft	5
ROV	Raumordnungsverfahren ergangen	6
ROVV	Raumordnungsverfahren in Vorbereitung	7
ROVB	Raumordnungsverfahren beantragt	8
LBV	Linienbestimmung in Vorbereitung	9
LB	Linie bestimmt / Trassenführung festgelegt	10
LBA	Linienbestimmung / Trassenfestlegung beantragt	11
TVF	Teilverkehrs freigabe 1	12
VU	Verkehrsuntersuchung läuft	13
PE	Planfeststellungserörterung stattgefunden	14
PF	Planfeststellungsbeschluss ergangen	15
PU	Planfeststellungsbeschluss unanfechtbar	16
UVS	Umweltverträglichkeits- / Variantenunt. abgeschlossen	17
PA	Planfeststellung beantragt	18

**Tabella 3-5. Planungsstand 1 bis 18**

Der Auswahlprozess ergibt eine Summe von 69 Baumaßnahmen auf 53 Straßen (Autobahnen und Bundesstraßen) mit einer Gesamtlänge von 1.134 km. Dabei wurden die wichtigsten Autobahnbauwerke berücksichtigt, die Abschnitte mit einer Länge von über 7 km umfassen. Die Implementierung dieser Maßnahmen wird im Folgenden beschrieben.

#### *Informationsbeschaffung zu den Baumaßnahmen*

Die Detailinformationen, wie Typ der Maßnahme, Länge, Projektnummer und die geographische Lage mit Start- und Endpunkt der Maßnahme werden aus den jeweiligen Projektdossiers des Bundesverkehrswegeplans 2030 entnommen.

Grundsätzlich kann zwischen den zwei Maßnahmentypen Verbreiterung der Straße (Ausbau einer Autobahn von 4 auf 6 oder 6 auf 8 FS) und Streckenneubau unterschieden werden. Bild 3-8 zeigt einen Ausschnitt des Beispieldossiers für die Erweiterung einer Autobahn von vier auf sechs Fahrstreifen.

1.1 Übersicht

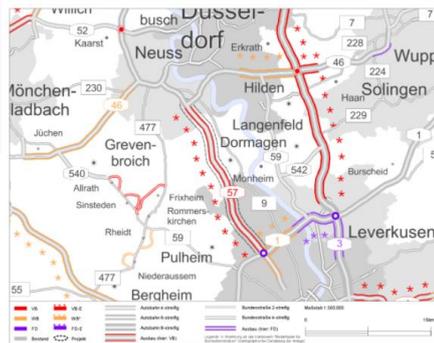


Abb. 1: Lage der Maßnahme

1.2 Grunddaten

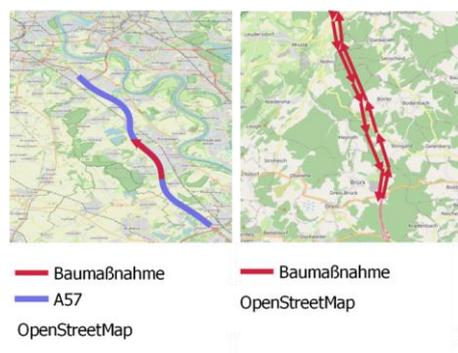
Projektnummer	A57-G20-NW
Bundesland	Nordrhein-Westfalen
Straße	A 57
Verbindungsfunktionsstufe 0/1	Ja
Anzahl der Teilprojekte	2
Länge	18,6 km
Bautyp(en), Bauziel(e)	Erweiterung auf 6 Fahrstreifen
Planungsstände <sup>1)</sup>	Planfeststellung beantragt am 03.02.2010 Vorentwurf Sichtvermerk am 23.09.2007
Künftige mittlere Verkehrsbelastung	
im Bezugsfall 2030	80.000 Kfz/24h
im Planfall 2030	82.000 Kfz/24h

Bild 3-8 Projektdossier Erweiterung von vier auf sechs Fahrstreifen (<https://www.bvwp-projekte.de/strasse/A57-G20-NW/A57-G20-NW.html>)

Modellierung der Baumaßnahmen

Die Informationen werden mit Hilfe von dem Editor JOSM (Java OpenStreetMap Editor) in die OSM-Dateien eingepflegt. Die Baumaßnahmen werden in JOSM verortet. Die modifizierten oder neu generierten Links werden in einer Tabelle zur Dokumentation der Veränderungen abgespeichert. Zusätzlich werden noch die zugehörigen Werte der Schlüsselmerkmale der Links angepasst. Bild 3-9 zeigt links ein Beispiel für den Maßnahmentyp 1. Bei der Erweiterung von vier auf sechs Fahrstreifen wird das Schlüsselmerkmal „Fahrstreifen“ der jeweiligen Richtungsfahrbahnen von zwei auf drei gesetzt. Auf der rechten Seite in Bild 3-9 ist ein Streckenneubau abgebildet. Hier wird der Streckenabschnitt verortet und die Schlüsselmerkmale Straßentyp, Fahrstreifen,

Einbahnstraße, Bezeichnung der Straße und Maximalgeschwindigkeit definiert. Wir haben die Maximalgeschwindigkeit von Straßen mit ähnlichen Merkmalen angenommen.



*Bild 3-9. Darstellung in JOSM (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende). Projektnummer A57-G20-NW (<https://www.bvwp-projekte.de/strasse/A57-G20-NW/A57-G20-NW.html>) und A001-G10-NW-RP-T01-RP (<https://www.bvwp-projekte.de/strasse/A001-G10-NW-RP-T01-RP/A001-G10-NW-RP-T01-RP.html>)*

Die Dokumentationstabelle und die modifizierte OSM- Datei dient als Grundlage für die Implementierung der neuen Straßen in das Modell.

## 3.2. Agentenbasiertes Modell

Bild 3-10 ist der Überblick über den Modellierungsansatz. Die Eingabedaten setzen sich zusammen aus dem Zonensystem, der synthetischen Bevölkerung und den Netzwerken. Begonnen wird mit der Simulation von MITO für Alltagsmobilität und für Personenfernverkehr. Die Ergebnisse sind die Anzahl der Reisen pro Person nach Zweck, mit spezifischem Start- und Zielort, Verkehrsmittel und Abfahrtszeit. Parallel dazu wird der Güterverkehr vom FOCA bestehend. Die drei Verkehrssegmente: Alltagsmobilität, Personenfernverkehr und Güterverkehr, werden in MATSim umgelegt. Die Ergebnisse sind die Verkehrsbelastungen, Reisezeiten und Stau und Emissionen. Die Ergebnisse werden mit den beobachteten Zählungen verglichen. Abweichungen zwischen beobachteten und simulierten Modellwerten werden mit den weiteren Kalibrationen minimisiert. Die Szenarien werden durch die Modifizierung vom entsprechen Eingabedaten definiert. Wir testen die Wirksamkeit der Szenarien nach dem Vergleich mit dem Basisszenario. Indikatoren können zum Beispiel der Modalsplit oder Gasemissionen sein.

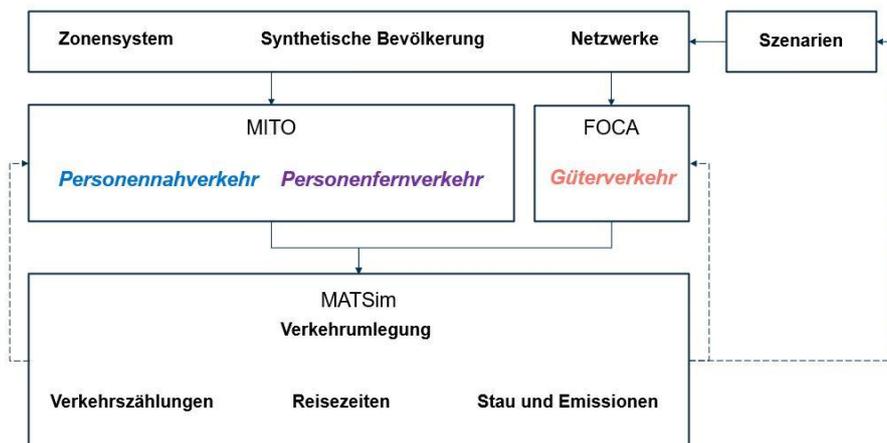


Bild 3-10. Überblick des agentenbasierten Modells

Die Beschreibung der Modelle wird in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

In diesem Projekt wird das bestehende agentenbasierte Verkehrsmodell MITO angewandt, mit dem die gleichen Szenarien untersucht werden wie mit dem Aggregierten Netzwerkmodell.

### 3.2.1. Personenfernverkehr

Dem Personenfernverkehr kommt in diesem Projekt eine besondere Rolle zu, weil er erheblich zur Belastung des Bundesfernstraßennetzes beiträgt. Auch wenn Fernfahrten nur zwei Prozent aller Wege ausmachen, so tragen sie wegen der längeren Distanzen zu 31% der gefahrenen Personenkilometer bei (MOECKEL und DONNELLY 2011). Das Modell für den Fernverkehr wurde hauptsächlich unter Verwendung der Daten der MiD 2017 entwickelt. Mit Hilfe der MiD werden Parameter für Fernfahrten geschätzt. Dieses neue Modell heißt ALDTO, was für Agent-based Long-Distance Travel Orchestrator steht.

Die Daten der die Verflechtungsmatrix des BMVI stellen Personenströmen unter Landkreise dar. Trotzdem werden Fern- und Nahverkehr in die Matrizen gemischt, und die Daten enthalten keine soziodemographischen Attribute der Reisenden. Deswegen werden die Matrizen nur für Validierung des Modells verwendet.

Das Fernverkehrsmodell ist ein Open Source Modell, das unter [https://github.com/msmobility/mito\\_long\\_distance](https://github.com/msmobility/mito_long_distance) heruntergeladen werden kann.

Das agentenbasierte Personenfernverkehrsmodell arbeitet in vier Schritten:

1. Fernfahrtengenerierung
2. Fernfahrtenzielwahl
3. Verkehrsmittelwahl
4. Wahl der Abfahrtszeit

### *Fernfahrtengenerierung*

Anhand der soziodemografischen Attribute werden für jeden Agenten Wahrscheinlichkeiten berechnet, eine Fernfahrt zu unternehmen. Dabei werden Tagesreisen, für die eine Hin- und Rückfahrt am simulierten Tag stattfindet, von Reisen mit Übernachtung(en) unterschieden. Außerdem werden mindestens die Wegezwecke Freizeit, Besuch von Freunden oder Verwandten und Dienstreise unterschieden, weil sie unterschiedliche Sensitivitäten bei der Verkehrsmittelwahl zeigen.

Die Daten für diese Modellschätzung sind der MiD B3 Wege-Datensatz, da diese Daten eine Momentaufnahme des Reiseverhaltens eines Tages darstellen. In diesem Modell gibt es vier Alternativen: keine Teilnahme an einer Fernreise, eine Tagesfernreise, eine Fernreise mit Übernachtung und Abwesenheit. Die erste Alternative wird als Basisfall vorgegeben und ihr Nutzen wird auf 0 gesetzt. Das Nutzen der anderen Alternativen werden mit der Basisalternative verglichen.

Das Schätzergebnis des Fernfahrtengenerierungsmodells sind in Tabelle 3-6 zusammengefasst. Es gibt 7 erklärende Variablen für die Fahrtengenerierung: Autobesitz (kein Auto als Basis), wirtschaftlicher Status (niedriges und sehr niedriges Einkommen als Basis), Alter (0-17 als Basis), Geschlecht (weiblich als Basis), Feiertag (Werktag als Basis), Beschäftigungsstatus (arbeitslos als Basis), regionale Art des Wohnorts (große und mittelgroße Stadt als Basis). Außerdem gibt es noch die Alternative spezifische Konstante (ASC), die für eine Alternative die durchschnittliche Auswirkung aller Faktoren auf den Nutzer, die nicht im Modell erhalten sind, wie z.B. Komfort und inhärente Präferenzen, erfasst.

Der Autobesitz hat einen positiven Einfluss auf die Generierung von Tagesfahrten, aber nicht auf die Generierung von Nachtfahrten. Dies impliziert, dass Menschen, die ein Auto besitzen, eher

Tages- als Übernachtungsreisen unternehmen. Was die Auswirkung des Einkommens betrifft, so ist es wahrscheinlicher, dass Tages- und Übernachtungsfernreisen unternommen werden, wenn das Einkommen höher ist. Ähnlich wie beim Einkommen neigen Menschen mit höherem Alter auch eher zu Fernreisen. Allerdings machen sie eher Tagesreisen als Übernachtungsreisen. Männer neigen dazu, mehr Tagesfernreisen zu unternehmen als Frauen. Menschen neigen auch dazu, im Urlaub mehr Langstrecken-Tagesreisen und Übernachtungsreisen zu unternehmen, wobei sie häufiger Übernachtungsreisen als Tagesreisen unternehmen. Interessanterweise neigen Personen, die berufstätig sind oder studieren, nicht so sehr zu privaten Fernreisen wie andere Personengruppen. Der Grund dafür könnte sein, dass sie unter der Woche verpflichtende Aktivitäten haben. Nicht zuletzt zeigen auch die Attribute des Gemeindetyps des Wohnorts, dass Menschen, die in ländlichen Gebieten leben, eher zu Tagesfernreisen, aber weniger zu Übernachtungsreisen neigen.

Darüber hinaus wurde das Modell kalibriert, um es an die beobachteten Daten der MiD 2017 anzupassen. Die Kalibrierungsfaktoren in Tabelle 3-6 liegen im Bereich zwischen -0,40 und 0,36, was als geringfügige Anpassung des Modells angesehen werden kann. Das Modell ist nach wie vor empfindlich und die Vorhersageleistung liegt näher an den beobachteten Daten. Die Ergebnisse der Modellvorhersage sind in Tabelle 3-7 zusammengefasst. Die Vorhersagefehler für jeden Fahrtzweck liegen unter 0,05 %.

Attribute	Privat				Dienstreise				Freizeitaktivitäten			
	Keine Fernreise	Tagesausflug	Ausflug mit Übernachtung	Unterwegs auf Reise	Keine Fernreise	Tagesausflug	Ausflug mit Übernachtun	Unterwegs auf Reise	Keine Fernreise	Tagesausflug	Ausflug mit Übernachtun	Unterwegs auf Reise
Alternative spezifische Konstante (ASC)	0,00	-6,20***	-5,04***	-9,14***	0,00	-10,27***	-10,30**	-19,65**	0,00	-5,57***	-5,16***	-8,25***
Hat ein oder mehrere Autos	0,00	0,39***	-0,18**	-	0,00	0,53***	-	-	0,00	0,38***	0,19***	-
Hat einen mittleren wirtschaftlichen Status	0,00	0,21***	0,21***	1,05***	0,00	-	-	-	0,00	0,31***	0,20***	0,70***
Hat einen hohen oder sehr hohen wirtschaftlichen Status	0,00	0,29***	0,33***	1,60***	0,00	0,25***	0,54***	-	0,00	0,42***	0,50**	0,86***
Ist 18-60 Jahre alt	0,00	0,68***	0,27***	-	0,00	2,06***	2,12**	9,20***	0,00	0,34**	0,36***	0,96***
Ist über 60 Jahre alt	0,00	0,82***	0,25***	0,76***	0,00	1,94**	1,94***	8,57*	0,00	0,59***	0,43***	1,06***
Ist männlich	0,00	0,10***	-	-	0,00	1,53***	1,28***	1,90***	0,00	0,14**	0,15**	-
Ist Feiertag	0,00	0,16*	0,98***	-	0,00	-1,28***	-0,96***	-	0,00	1,41***	1,05***	1,40***
Ist angestellt	0,00	-0,28***	-0,16***	-	0,00	2,83***	2,20*	1,88**	0,00	-0,19***	-	-
Ist Student	0,00	-0,30***	-	-	0,00	-	-	-	0,00	-	0,27**	0,57***
Ist Gemeindetyp mittelgroße Stadt	0,00	0,11**	-	-	0,00	0,12*	-	-	0,00	-	-0,10**	-
Ist Gemeindetyp ländlich	0,00	0,21*	-0,19***	-	0,00	0,16***	-	-	0,00	-	-	-
Kalibrierungsfaktor	0,00	0,36	0,10	0,04	0,00	-0,18	-0,05	0,05	0,00	-0,30	-0,40	-0,01

Tabelle 3-6. Schätzergebnis des Fernfahrtengenerierungsmodells

Die Werte in der Tabelle stellen die geschätzten Koeffizienten dar, und das Signifikanzniveau ist mit \* (p-Wert<0,10), \*\* (p-Wert <0,05) und \*\*\* (p-Wert<0,01) angegeben.

Fahrtzweck	Keine Fernreise		Tagesausflug		Ausflug mit Übernachtung		Unterwegs auf Reise	
	Modelle	MiD2017	Modelle	MiD2017	Modelle	MiD2017	Modelle	MiD2017
Privat	98,14%	98,16%	1,11%	1,11%	0,68%	0,70%	0,07%	0,04%
Dienstreise	97,93%	97,96%	1,65%	1,65%	0,35%	0,35%	0,07%	0,04%
Freizeitaktivität	98,11%	98,12%	0,88%	0,89%	0,89%	0,88%	0,12%	0,11%

**Tabelle 3-7 Ergebnis der Schätzung der Fernfahrtengenerierung**

### Fernfahrtenzielwahl

Der aktuelle MiD-Datensatz B3 Wege verlangt von den Befragten keine Angaben zu den Reisezielen, so dass wir nicht unterscheiden können, ob die Reise innerhalb Deutschlands oder außerhalb Deutschlands beendet wurde, wenn in der Umfrage kein Ziel angegeben wurde. Der B1 Reise-Datensatz liefert uns jedoch die Ziele von Ausflug mit Übernachtung auf drei Ebenen: Inland, internationales Europa und Übersee. Daher haben wir insgesamt 4 Zielwahlmodelle geschätzt (Bild 3-11):

- ein Modell für die Zielwahl des Tagesausflugs (Inland und Ausland)
- ein Modell für die Zielwahl des Ausflugs mit Übernachtung in die drei groben Zielebenen (Inland, internationales Europa, oder Übersee)
- ein Modell für die Zielwahl des Ausflugs mit Übernachtung im Inland
- ein Modell für die Zielwahl des Ausflugs mit Übernachtung im europäischen Ausland.

Da die Fahrten außerhalb von Europa nicht im Mittelpunkt dieses Projekts stehen, ordnen wir die Überseereisen anteilig den anderen Kontinenten zu. Diese Reisen wurden in unserer Simulation zum nächsten gelegenen Flughafen simuliert. Im folgenden Abschnitt werden die Zielwahlmodelle im Einzelnen näher erläutert.



**Bild 3-11 Struktur der Zielwahlmodelle**

Alle Daten im MiD B3 Wege-Datensatz, die als Tagesausflüge identifiziert wurden, wurden für die Modellschätzung für die Zielwahl des Tagesausflugs verwendet. Für die Zielwahl des Tagesausflugs wird zunächst die Attraktion von möglichen Zielzonen in Form von Bevölkerung, Beschäftigung und Anzahl der Hotels berücksichtigt. Dabei wird Zielen in kürzerer Entfernung ein höheres Gewicht gegeben als weit entfernt liegenden Zielen. Als Impedanz wird die Distanz verwendet. Die Ergebnisse zeigen uns, dass die Wahrscheinlichkeit der Zielwahl mit zunehmender Entfernung erwartungsgemäß abnimmt (siehe Tabelle 3-8). Die Gesamtzahl der Bevölkerung und der Arbeitsplätze sowie die Anzahl der Hotels wirken sich positiv auf den Nutzen aus, was bedeutet, dass Reiseziele mit einer größeren Anzahl von Einwohnern und Arbeitsplätzen sowie der Anzahl von Hotels mit größerer Wahrscheinlichkeit gewählt werden würden. Außerdem wurden die Modelle kalibriert, um der beobachteten durchschnittlichen Reisedauer zu entsprechen, und die Ergebnisse wurden in Tabelle 3-8 zusammengefasst. Insgesamt haben die Modellergebnisse eine gute Anpassung mit absoluten Fehlern zwischen -1,22 und 0,70 Kilometern.

Attribute	Tagesausflug		
	Privat	Dienstreise	Freizeitaktivitäten
log10(Entfernung)	-3,96***	-4,76***	-4,35***
Bevölkerung + Beschäftigung	50,17***	73,45***	51,75***
Anzahl der Hotels	0,56**	0,61***	0,65***
Kalibrierungsfaktor	1,11	1,12	1,12

Die Werte in der Tabelle stellen die geschätzten Koeffizienten dar, und das Signifikanzniveau ist mit \* (p-Wert<0,10), \*\* (p-Wert <0,05) und \*\*\* (p-Wert<0,01) angegeben.

**Tabelle 3-8. Schätzergebnis des Fernziel-Auswahlmodells (Tagesausflug, Inland und Ausland)**

Durchschnittliche Fahrtlänge (km) (Standardabweichung)	Privat	Dienstreise	Freizeitaktivitäten
Modell	180,51 (209,54)	175,85 (174,39)	204,53 (196,99)
MiD 2017	179,81 (154,66)	177,07 (172,89)	204,94 (186,86)

**Tabelle 3-9 Ergebnis der Schätzung der Fernfahrtenzielwahl (Tagesausflug, Inland und Ausland)**

Der MiD B1 Reise-Datensatz wurde für die Schätzung des Zielwahlmodells von Ausflug mit Übernachtung um die drei groben Zielebenen verwendet. Das Schätzergebnis sind in [Tabelle 3-10](#) ~~Tabelle 3-10~~ [Tabelle 3-10](#) zusammengefasst. Es gibt 6 erklärende Variablen für die Zielwahl: wirtschaftlicher Status (niedriges und sehr niedriges Einkommen als Basis), Alter (0-17 als Basis), Geschlecht (weiblich als Basis), Größe des Haushalts, Beschäftigungsstatus (arbeitslos, pensioniert und Haushälterin als Basis), regionale Art des Wohnorts (große Stadt als Basis).

Der wirtschaftliche Status hat einen positiven Einfluss auf die Zielwahl im Ausland, vor allem die Haushalte mit einem hohen und sehr hohen wirtschaftlichen Status. Dies impliziert, dass Menschen,

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

die zu einem Haushalt mit hohem Haushaltseinkommen gehört, eher Übernachtungsreisen im Ausland als im Inland unternehmen. Ähnlich wie beim wirtschaftlichen Status neigen Menschen mit höherem Alter auch eher zu Ausflügen mit Übernachtungen in Übersee. Allerdings machen sie eher Übernachtungsreisen im Ausland Europa weniger als im Inland. Männer neigen dazu, Ziel im Ausland zu wählen als Frauen. Menschen neigen auch dazu, weniger Überseeereisen mit Übernachtungen zu unternehmen, wenn die Größe des Haushalts größer ist. Interessanterweise neigen Personen, die berufstätig sind oder studieren, inländische Ziele auszuwählen. Der Grund dafür könnte sein, dass sie unter der Woche verpflichtende Aktivitäten haben und nicht weit fahren können. Nicht zuletzt zeigen auch die Attribute des Gemeindetyps des Wohnorts, dass Menschen, die in ländlichen Gebieten, in Städten oder in mittelgroßen Städten leben, eher zu inländischen Übernachtungsreisen, aber weniger zu internationalen Übernachtungsreisen neigen.

Attribute	Privat			Dienstreise			Freizeitaktivitäten		
	Inland	Ausland, Europa	Ausland, Übersee	Inland	Ausland, Europa	Ausland, Übersee	Inland	Ausland, Europa	Ausland, Übersee
Alternative spezifische Konstante (ASC)	0,00	-1,79***	-3,68***	0,00	-1,99***	-7,78***	0,00	0,02***	-2,34***
Hat einen mittleren wirtschaftlichen Status	0,00	-	-	0,00	-	-	0,00	0,12***	0,40***
Hat einen hohen wirtschaftlichen Status	0,00	0,22***	0,25***	0,00	0,31***	0,30***	0,00	0,36***	0,64***
Hat sehr hohen wirtschaftlichen Status	0,00	-	-	0,00	0,31***	0,30***	0,00	0,36***	0,64***
Ist 18-60 Jahre alt	0,00	-	-	0,00	-	4,45***	0,00	-0,31**	0,66***
Ist über 60 Jahre alt	0,00	-	-0,31*	0,00	-	4,07***	0,00	-0,45***	-
Ist männlich	0,00	-	-	0,00	0,42***	0,67***	0,00	0,07**	-
Größe des Haushalts	0,00	-	-	0,00	-	-	0,00	0,03*	-0,18*
Ist angestellt	0,00	-0,40***	-0,57***	0,00	0,30***	-	0,00	-0,11**	-
Ist Student	0,00	-0,45***	-0,70***	0,00	-	-	0,00	-	-0,27
Ist Gemeindetyp Stadt oder mittelgroße Stadt	0,00	-	-	0,00	-0,37*	-	0,00	-0,17***	-0,42***
Ist Gemeindetyp ländlich	0,00	-0,13*	-	0,00	-0,32**	-	0,00	-0,19***	-0,48***
Kalibrierungsfaktor	0,00	-0,08	-0,36	0,00	-0,08	-0,34	0,00	-0,11	0,08

Die Werte in der Tabelle stellen die geschätzten Koeffizienten dar, und das Signifikanzniveau ist mit \* (p-Wert<0,10), \*\* (p-Wert <0,05) und \*\*\* (p-Wert<0,01) angegeben.

*Tabelle 3-10. Schätzergebnis des Fernziel-Auswahlmodells (Ausflug mit Übernachtung, grobes Zielwahl: Inland, internationales Europa und Übersee)*

Des Weiteren wurde das Modell kalibriert, um es an die beobachteten Daten der MiD 2017 anzupassen. Die Kalibrierungsfaktoren in Tabelle 3-10 liegen im Bereich zwischen -0,36 und 0,08, was als geringfügige Anpassung des Modells angesehen werden kann. Das Modell ist nach wie vor empfindlich und die Vorhersageleistung liegt näher an den beobachteten Daten. Die Ergebnisse der Modellvorhersage sind in Tabelle 3-11 zusammengefasst. Die Vorhersagefehler für jedes Ziel liegen zwischen -0,46% und 0,25%.

Fahrtzweck	Inland		Europa		Übersee	
	Modelle	MiD2017	Modelle	MiD2017	Modelle	MiD2017
Privat	88,05%	87,99%	10,88%	10,98%	1,07%	1,03%
Dienstreise	79,03%	79,24%	17,35%	16,89%	3,62%	3,87%
Freizeitaktivität	54,13%	53,88%	40,42%	40,57%	5,44%	5,55%

**Tabelle 3-11 Ergebnis der Schätzung der Fernfahrtzielwahl (Ausflug mit Übernachtung, grobes Zielwahl: Inland, internationales Europa und Übersee)**

Für die Zielwahlmodellschätzung des inländischen Ausfluges mit Übernachtungen werden die Daten im MiD B3 Wege-Datensatz, die als Übernachtungsreise und mit angegebenen Zielorten identifiziert wurden, verwendet. Für die Zielwahl der inländischen Übernachtungsreisen wird zunächst die Attraktion von möglichen Zielzonen in Form von Bevölkerung, Beschäftigung und Anzahl der Hotels berücksichtigt. Dabei wird Zielen in kürzerer Entfernung ein höheres Gewicht gegeben als weit entfernt liegenden Zielen. Als Impedanz wird die Distanz verwendet. Die Ergebnisse zeigen uns, dass die Wahrscheinlichkeit der Zielwahl mit zunehmender Entfernung erwartungsgemäß abnimmt (siehe Tabelle 3-12). Die Gesamtzahl der Bevölkerung und der Arbeitsplätze sowie die Anzahl der Hotels wirken sich positiv auf den Nutzen aus, was bedeutet, dass Reiseziele mit einer größeren Anzahl von Einwohnern und Arbeitsplätzen sowie der Anzahl von Hotels mit größerer Wahrscheinlichkeit gewählt werden würden. Außerdem wurde die Modelle kalibriert, um der beobachteten durchschnittlichen Reisedauer zu entsprechen. Die Kalibrierungsfaktoren für dieses Modell liegt zwischen 1,02 und 1,08.

Da es nicht möglich ist, die Reiseziele europäischer Übernachtungsreisen im MiD B3-Wege Datensatz zu ermitteln, wurden die Koeffizienten des vorherigen Modells verwendet, um das Zielwahlverhalten von Übernachtungsreisen zu europäischen Zielen zu beschreiben. Das Modell wurde jedoch so kalibriert, dass es mit der beobachteten Reisedauer aus dem B1 Reise-Datensatz übereinstimmt. Die Kalibrierungsfaktoren für dieses Modell liegen zwischen 0,61 und 1,30, was größer ist als beim vorherigen Modell.

Die Ergebnisse nach der Kalibrierung wurden in Tabelle 3-13 zusammengefasst. Insgesamt haben die Modellergebnisse eine gute Anpassung mit absoluten Fehlern zwischen -2,60 und -0,32 Kilometern von dem inländischen Ausflug mit Übernachtungen und zwischen -6,15 und -21,00 Kilometern von den Übernachtungsreisen in Europa.

Attribute	Ausflug mit Übernachtung		
	Privat	Dienstreise	Freizeitaktivitäten
log10(Entfernung)	-3,47***	-2,75***	-3,41***
Bevölkerung + Beschäftigung	74,78**	102,78***	3,25**
Anzahl der Hotels	0,51**	0,48***	2,09***
Kalibrierungsfaktor für Inland	1,02	1,07	1,08
Kalibrierungsfaktor für Ausland, Europa	0,86	1,30	0,61

Die Werte in der Tabelle stellen die geschätzten Koeffizienten dar, und das Signifikanzniveau ist mit \* (p-Wert < 0,10), \*\* (p-Wert < 0,05) und \*\*\* (p-Wert < 0,01) angegeben.

**Tabelle 3-12. Schätzergebnis des Fernziel-Auswahlmodells (Ausflug mit Übernachtung, Inland und Ausland Europa)**

Durchschnittliche Fahrtlänge (km) (Standardabweichung)	Inland			Europa		
	Privat	Dienstreise	Freizeitaktivitäten	Privat	Dienstreise	Freizeitaktivitäten
Modell	258,21 (193,18)	229,18 (189,32)	226,69 (187,50)	971,76 (654,49)	1228,34 (947,61)	887,36 (699,50)
MiD 2017	260,81 (184,99)	229,05 (175,08)	227,18 (174,15)	950,76 (693,51)	1234,49 (780,90)	866,97 (620,41)

**Tabelle 3-13 Ergebnis der Schätzung der Fernfahrtzielwahl (Ausflug mit Übernachtung, Inland)**

### Verkehrsmittelwahl

Mit Hilfe eines Logitmodells wird der Verkehrsmodus ausgewählt. Dabei sollen mindestens die Verkehrsmodi PKW, Ride-Sharing, Bahn, Fernbus und Flug unterschieden werden. Leider wird der Verkehrsmodus Ride-Sharing (wie zum Beispiel BlaBlaCar) in der MiD nicht explizit abgebildet. Mit über 20 Millionen Reisenden im Jahr 2017 hat BlaBlaCar einen Marktanteil im Fernverkehr erwirtschaftet, der nicht im Modell ignoriert werden darf. Ride-Sharing wird deshalb mit Hilfe eines Incremental Logit Modells (KOPPELMAN 1983) abgebildet.

Die Schätzung der Verkehrsmittelwahlmodelle basiert auf dem MiD B3\_Wege Datensatz, da dieser Datensatz nicht nur Informationen über den Start- und Zielort, sondern auch über die Reisecharakteristika wie Reisezeit, Reisekosten und andere persönliche Merkmale enthält. Nun haben die inländischen Fahrten komplette Datenangaben, deswegen wurden die Verkehrsmittelwahlmodelle für inländische Tagesausflüge und inländischen Ausflüge mit Übernachtungen mit diesen Daten ausgewertet. Die Verkehrsmittelwahlmodelle für internationale

Fahrten in Europa wurden mit der Verteilung des Verkehrsmittels in MiD B1\_Reise Datensatz kalibriert.

Während der Modellschätzung wurde eine starke Korrelation zwischen der Anzahl der Führerscheine und der Anzahl der Haushaltsmitglieder festgestellt. In Anbetracht der Tatsache, dass diese Variablen ähnliche Daten erklären, wurde die Anzahl der Führerscheine pro Haushalt aus der Modellschätzung ausgeschlossen. Um die Sensitivität in Bezug auf Reisezeit und -kosten einzubeziehen, haben wir die generalisierten Reisekosten einbezogen. Die verallgemeinerten Reisekosten werden nach der Gleichung G3 berechnet:

$$t_{ijm} = t'_{ijm} + \frac{K_{ijm}}{VOT} \quad G3$$

wobei:

- $t$  ist die verallgemeinerten Reisekosten in Stunden
- $t'$  ist die Fahrzeit in Stunden
- $K$  sind die Kosten der Reise, €
- $VOT$  ist der Wert der Zeit (65 €/Std für Geschäftsreisen, 32 €/Std für Privat- und Freizeitreisen).

In Bezug auf  $VOT$ , die hier verwendete Werten werden von der Literatur über Fernverkehrsmodelle angenommen (Llorca et al, 2018a). Die Werten unterschieden sich von Werten für den Nahverkehr. Das ist sinnvoll, als die Wirkung von Reisekosten auf Verkehrsmittelwahl gering ist, wenn die Fahrten selten sind. Diese Werte entsprechen die Größenordnung der Werten des Fahrtzwecks Geschäft, die für die Bundesverkehrswegeplan 2030 ermittelt werden (PTV, 2016, S. 99).

Die Ergebnisse der Modellschätzung für Tages- und Übernachtungsfahrten sind in Tabelle 3-14 bzw. Tabelle 3-15 zusammengefasst und bestehen aus 5 Attributen. Auto wurde als Basisalternative gewählt (Nutzen ist gleich Null). Es gibt alternativspezifische Konstante und 6 erklärende Variablen für die Fahrtengenerierung: Geschlecht (weiblich als Basis), Beschäftigungsstatus (arbeitslos als Basis), Größe des Haushalts (über 3 Personen als Basis), Alter (18-59 als Basis), wirtschaftlicher Status (mittels Einkommen als Basis) und die verallgemeinerten Reisekosten. Die alternativspezifische Konstante zeigte die geringe Wahrscheinlichkeit der Wahl des Flugzeugs für eine tägliche Fahrt und Fahrt mit Übernachtung zur Privat oder Dienstreise, während die Bahn die geringste Wahrscheinlichkeit bei der Fahrt für Freizeitaktivitäten mit

Übernachtung hat. Egal ob es Tagesfahrt oder Ausflug mit Übernachtung, neigen Männer dazu, den Fernzug zu vermeiden. Allerdings fahren die Studenten wahrscheinlicher mit dem Fernzug als anderen Verkehrsmitteln. Interessanterweise neigen Personen, die berufstätig sind, nicht so sehr zum Fernzug auf Tagesausflug aber sehr zu Fernzug auf Übernachtungsreise. Eine kleine Größe des Haushalts hat einen positiven Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl mit Fernzügen. Dies impliziert, dass Menschen, die alleine oder mit anderen zusammenwohnen, eher mit der Bahn fahren als mit dem Auto. Was die Auswirkung des Einkommens betrifft, so ist es wahrscheinlicher, dass Fernzug ausgewählt wird, wenn das Einkommen niedriger ist. Wenn das Einkommen höher ist, neigen die Menschen weg von Fernzug auf Privatreise, aber sie neigen zur Bahnreise für Freizeitaktivitäten. Menschen, die unter 18 Jahre alt sind, neigen nicht eher zu Bahnreise, aber ältere Menschen neigen zum Fernzug für Übernachtungsreisen, aber nicht für Tagesreise.

Die zwei Verkehrsmittelwahlmodelle wurden mit der Verkehrsträgerverteilung der Datensätze B3\_Wege (inländische Fahrten) und B1\_Reise (Fahrten in Europa) kalibriert, um es an die beobachteten Daten anzupassen. Die Kalibrierungsfaktoren von inländischen Tagesfahrten in Tabelle 3-14 liegen im Bereich zwischen -0,6304 und 4,3163 und die Faktoren von inländischen Übernachtungsreise in [Tabelle 3-15](#)~~Tabelle 3-15~~~~Tabelle 3-15~~ liegen im Bereich zwischen -0,1925 und 3,4616. Der Kalibrierungsfaktor ist für das Modus Flugzeug größer, da die Stichprobengröße für diesen Typ sehr gering ist, was zu einer unzureichenden Variation bei der Modellschätzung führt. Da keine Daten für die Schätzung des Verkehrsmittelwahlmodells für Fahrten in andere europäische Länder vorliegen, wurden die inländischen Verkehrsmittelwahlmodelle verwendet und mit dem B1-Reisedatensatz kalibriert. Die Kalibrierungsfaktoren von europäischen Tagesfahrten in Tabelle 3-14 liegen im Bereich zwischen 0,1772 und 3,8264 und die Faktoren von europäischen Übernachtungsreise in [Tabelle 3-15](#)~~Tabelle 3-15~~~~Tabelle 3-15~~ liegen im Bereich zwischen 0,7708 und 5,1347. Die Kalibrierungsfaktoren für Flugzeug-, Fernbus- und Fernzugreisen in Europa sind größer als die für Inlandsreisen, da das Inlandsmodell den PKW offenbar überschätzt.

Die Ergebnisse der Modellvorhersagen sind in [Tabelle 3-16](#), [Tabelle 3-17](#), [Tabelle 3-17](#) und [Tabelle 3-18](#), [Tabelle 3-18](#), [Tabelle 3-18](#), zusammengefasst. Die Vorhersagefehler für jeden Modus liegen meistens zwischen -0,50% und 0,05%. Nur die private Übernachtungsreise in Europa mit PKW beträgt auf -1,44%.

Attribute	Privat				Dienstreise				Freizeitaktivitäten			
	PKW	Flugzeug	Fernbus	Fernzug	PKW	Flugzeug	Fernbus	Fernzug	PKW	Flugzeug	Fernbus	Fernzug
Alternative spezifische Konstante (ASC)	0,0000	-4,0077***	-2,6013**	-0,5266	0,0000	-5,2528***	-1,0948	0,9595*	0,0000	-6,8100***	-2,2772***	-1,2540***
Ist männlich	0,0000	-	-	-0,9197***	0,0000	-	-	-1,5002***	0,0000	-	-	-
Ist Student	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	1,0421**
Ist angestellt	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-0,8579**
Ist HH Größe 1 Person	0,0000	-	-	1,8101***	0,0000	-	-	1,0466***	0,0000	-	-	1,1857***
Ist HH Größe 2 Personen	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	1,1857***
Ist HH Größe 3 Personen	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-
Ist unter 18	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-3,7331***
Ist über 60 Jahre alt	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-	0,0000	-	1,3992***	-1,6828***
Ist niedriger/sehr niedrig HH wirtschaftlicher Status	0,0000	-	3,5175***	-	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-
Ist hoher/sehr hoch HH wirtschaftlicher Status	0,0000	-	-	-0,7103*	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-
Impedanz	11,5137***	11,5137***	11,5137***	11,5137***	14,0941***	14,0941***	14,0941***	14,0941***	4,9186***	4,9186***	4,9186***	4,9186***
Kalibrierungsfaktor, Inland	0,0000	0,0447	-0,6304	0,0793	0,0000	4,3163	0,7755	-0,3263	0,0000	4,2045	0,7215	0,4411
Kalibrierungsfaktor, Ausland, Europa	0,0000	0,1772	0,2052	0,5839	0,0000	3,8264	1,9039	0,2764	0,0000	3,8084	1,3608	0,8628

Die Werte in der Tabelle stellen die geschätzten Koeffizienten dar, und das Signifikanzniveau ist mit \* (p-Wert<0,10), \*\* (p-Wert <0,05) und \*\*\* (p-Wert<0,01) angegeben.

Tabelle 3-14. Verkehrsmittelauswahlkoeffizienten für Tagesausflüge

Attribute	Privat				Dienstreise				Freizeitaktivitäten			
	PKW	Flugzeug	Fernbus	Fernzug	PKW	Flugzeug	Fernbus	Fernzug	PKW	Flugzeug	Fernbus	Fernzug
Alternative spezifische Konstante (ASC)	0,0000	-4,0103***	-2,5360***	-2,7315***	0,0000	-2,8919***	0,0000	0,8400*	0,0000	-3,9027***	-4,3267***	-3,4815***
Ist männlich	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-0,8858**	0,0000	-	-	-
Ist Student	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-	0,0000	-	2,6215***	2,8098***
Ist angestellt	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	1,8956*
Ist HH Größe 1 Person	0,0000	-	-	2,4550***	0,0000	-	-	-	0,0000	-	2,7762***	0,5288***
Ist HH Größe 2 Personen	0,0000	-	-	1,3651*	0,0000	-	-	-	0,0000	-	2,7762***	0,5288***
Ist HH Größe 3 Personen	0,0000	-	-	1,3651*	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-1,5015***
Ist unter 18	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-
Ist über 60 Jahre alt	0,0000	-	-	1,7440***	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	1,2015***
Ist niedriger/sehr niedrig HH wirtschaftlicher Status	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	-
Ist hoher/sehr hoch HH wirtschaftlicher Status	0,0000	-	-	-1,5919***	0,0000	-	-	-	0,0000	-	-	0,7983**
Impedanz	4,2294***	4,2294***	4,2294***	4,2294***	7,3072***	7,3072***	7,3072***	7,3072***	6,9626***	6,9626***	6,9626***	6,9626***
Kalibrierungsfaktor, Inland	0,0000	-0,0910	1,4175	-0,1925	0,0000	2,8213	-0,1256	-0,0436	0,0000	3,4616	2,6241	0,8289
Kalibrierungsfaktor, Ausland, Europa	0,0000	4,9278	3,7806	1,3115	0,0000	5,1347	1,3118	0,7708	0,0000	4,9053	4,1498	0,9551

Die Werte in der Tabelle stellen die geschätzten Koeffizienten dar, und das Signifikanzniveau ist mit \* (p-Wert<0,10), \*\* (p-Wert <0,05) und \*\*\* (p-Wert<0,01) angegeben.

Tabelle 3-15. Verkehrsmittelauswahlkoeffizienten für Übernachtungsfahrten

Fahrtzweck	Wert	Verkehrsmittel			
		PKW	Flugzeug	Fernbus	Fernzug
Privat	MiD 2017	90.25%	0.08%	1.00%	8.67%
	Modell	90.15%	0.07%	1.02%	8.75%
Dienstreise	MiD 2017	87.21%	1.52%	1.20%	10.08%
	Modell	87.26%	1.48%	1.20%	10.06%
Freizeitaktivitäten	MiD 2017	82.99%	0.84%	5.07%	11.10%
	Modell	82.89%	0.89%	5.00%	11.21%

**Table 3-16 Ergebnisse der Schätzung der Verkehrsmittelwahl (Tagesausflug, Inland und Europa)**

Fahrtzweck	Wert	Verkehrsmittel			
		PKW	Flugzeug	Fernbus	Fernzug
Privat	MiD 2017	79.50%	0.33%	4.47%	15.71%
	Modell	79.59%	0.30%	4.53%	15.58%
Dienstreise	MiD 2017	70.05%	10.44%	2.53%	16.99%
	Modell	69.73%	10.37%	2.73%	17.18%
Freizeitaktivitäten	MiD 2017	73.83%	5.96%	6.66%	13.54%
	Modell	74.17%	5.71%	6.13%	13.99%

**Table 3-17 Ergebnisse der Schätzung der Verkehrsmittelwahl (Inländischer Ausflug mit Übernachtung)**

Fahrtzweck	Wert	Verkehrsmittel			
		PKW	Flugzeug	Fernbus	Fernzug
Privat	MiD 2017	41.63%	35.32%	8.53%	41.63%
	Modell	40.49%	34.97%	8.40%	40.49%
Dienstreise	MiD 2017	26.25%	58.83%	5.35%	26.25%
	Modell	25.70%	58.65%	5.59%	25.70%
Freizeitaktivitäten	MiD 2017	49.53%	37.84%	6.55%	49.53%
	Modell	49.72%	37.57%	6.44%	49.72%

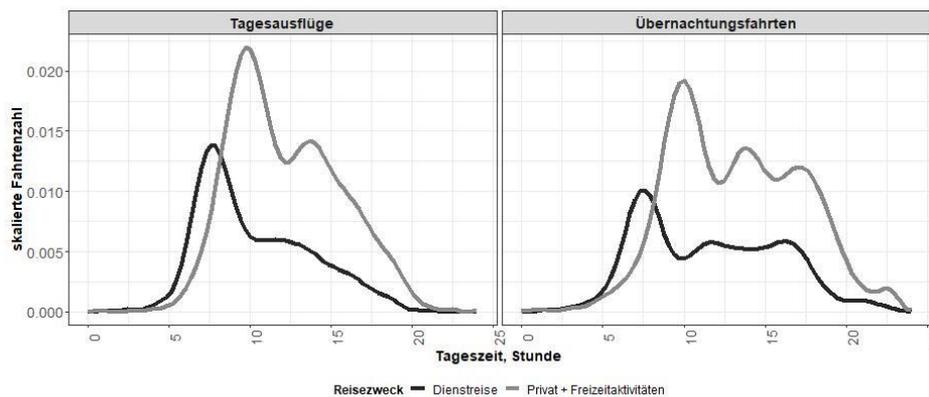
**Table 3-18 Ergebnisse der Schätzung der Verkehrsmittelwahl (Ausflug mit Übernachtung in Europa)**

### Wahl der Abfahrtszeit

Der MID-Datensatz enthält Informationen über die Abfahrtszeit für jede gemeldete Reise. Alle Aufzeichnungen von Fernreisen wurden in zwei Gruppen unterteilt: Tages- und Übernachtungsreisen sowie Hin- und Rückreisen. Da die stündlichen Abfahrtszeiten davon abhängen können, welches Verkehrsmittel für einen bestimmten Fahrtzweck gewählt wird, haben wir die Abfahrtszeit nach Fahrtzweck und Verkehrsmittel geschätzt. Zum Beispiel können Freizeitreisende später abreisen als Geschäftsreisende. Diese Segmentierung führt jedoch zu einigen kleinen Gruppen. So lag beispielsweise die Zahl der Flugdaten unter 30, so dass keine Unterscheidung nach Fahrtzweck möglich war.

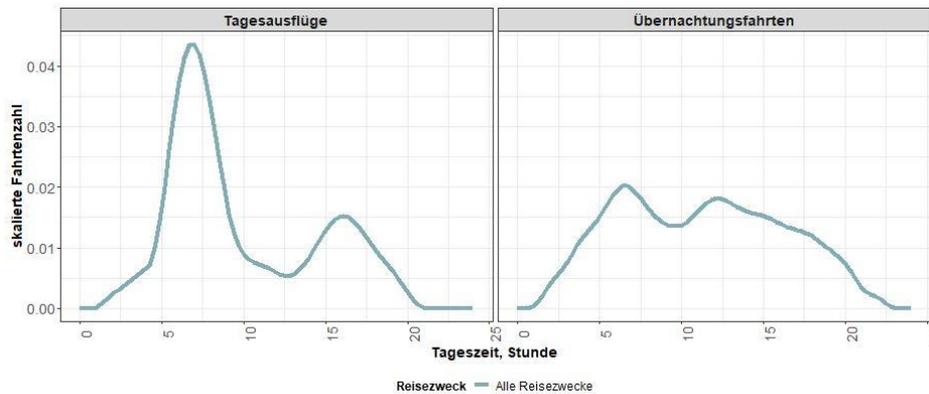
In einer ersten Analyse stellten wir fest, dass die Verteilung der Abflugzeiten von Freizeit- und Privatreisen sehr ähnlich war. Daher haben wir beide Fahrtzwecke zusammengefasst und nur zwischen Geschäftsreisen und anderen Fahrtzwecken unterschieden. Aufgrund der Ähnlichkeit des Zeitverteilungsprofils wurden einige Fahrtzwecke ebenfalls zusammengefasst, wie z. B. bei Fernbusübernachtungsreisen.

Bild 3-12 zeigt die Verteilung der Abfahrtszeiten von Tages- und Übernachtungsreisen mit dem Auto. Die morgendliche Hauptverkehrszeit für Tagesreisen liegt zwischen 6:00 und 9:00 Uhr für Dienstreise, für Privat- und Freizeitreise ist die morgendliche Hauptverkehrszeit leicht zwischen 9:00 und 11:00 Uhr verschoben. Bei Übernachtungsreisen ist die morgendliche Spitze bei Freizeit- und Privatreisen später. Wie erwartet, neigen Reisende bei Tagesreisen dazu, früher abzureisen, um die Zeit am Zielort zu maximieren.



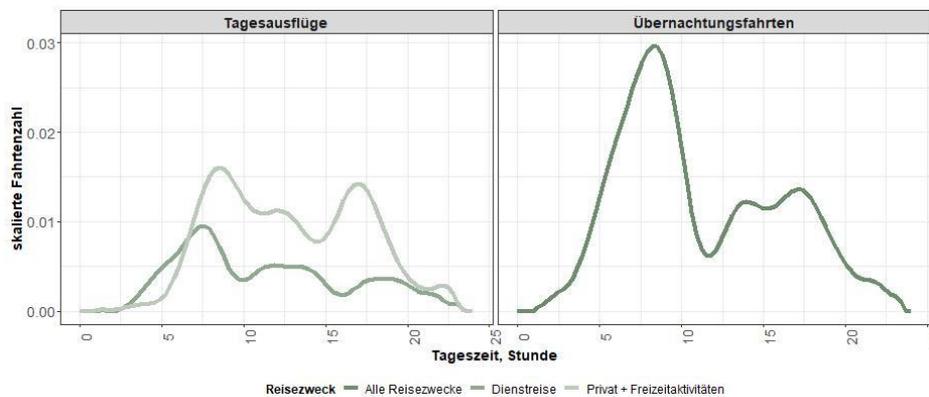
**Bild 3-12. Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Abfahrtszeit - PKW**

Bei Flugreisen ist die Verteilung der Abflüge nicht so flexibel wie bei Autoreisen und hängt mit den Abflugzeiten an den Flughäfen zusammen, was zu einer eher flachen Verteilung führt (Bild 3-13). Wir können nur bei Tagesausflügen eine morgendliche Spitze beobachten, da die Rückreise am selben Tag erfolgen soll.



**Bild 3-13. Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Abflugzeit - Flugzeug**

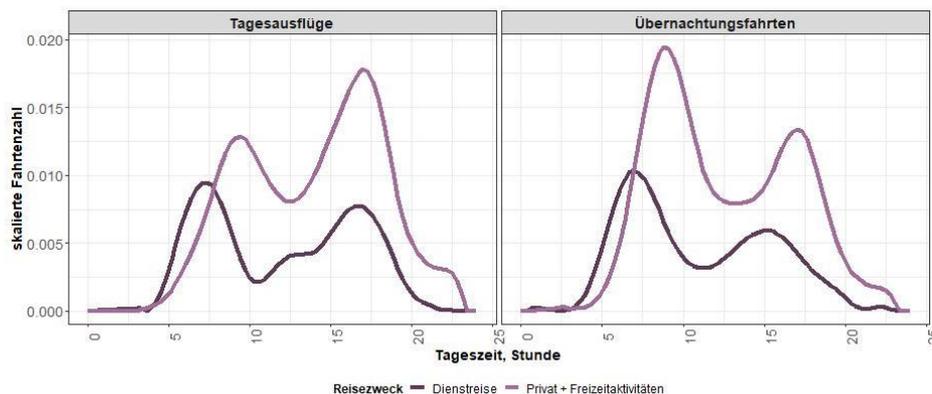
Bei Tagesausflügen mit dem Bus ist eine flachere Verteilung der Abfahrtszeiten zu beobachten. Dies kann, wie bei Flugreisen, auf den festen Fahrplan der Fernbusse zurückzuführen sein. Dennoch können wir eine Morgen- und Nachmittagsspitze beobachten (Bild 3-14). Bei Übernachtungsreisen tritt die morgendliche Spitze etwas später auf, zwischen 9:00 und 10:00 Uhr.



**Bild 3-14. Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Abfahrtszeit - Fernbus**

Bei Bahnreisen können wir eine morgendliche Spitze um 8:00 Uhr für Geschäftsreisende beobachten (Bild 3-15). Andere Fahrtzwecke haben eine spätere Morgenspitze. Diese Variabilität bei den Abfahrtszeiten ist zwar nicht so groß wie bei den Autofahrern, aber eine Folge der hohen

Frequenz der Dienste über den Tag verteilt. Dies steht im Gegensatz zu den flacheren Verteilungen bei Bus- und Flugreisen, die auf eine geringere Anzahl von Verbindungen zurückzuführen sind.



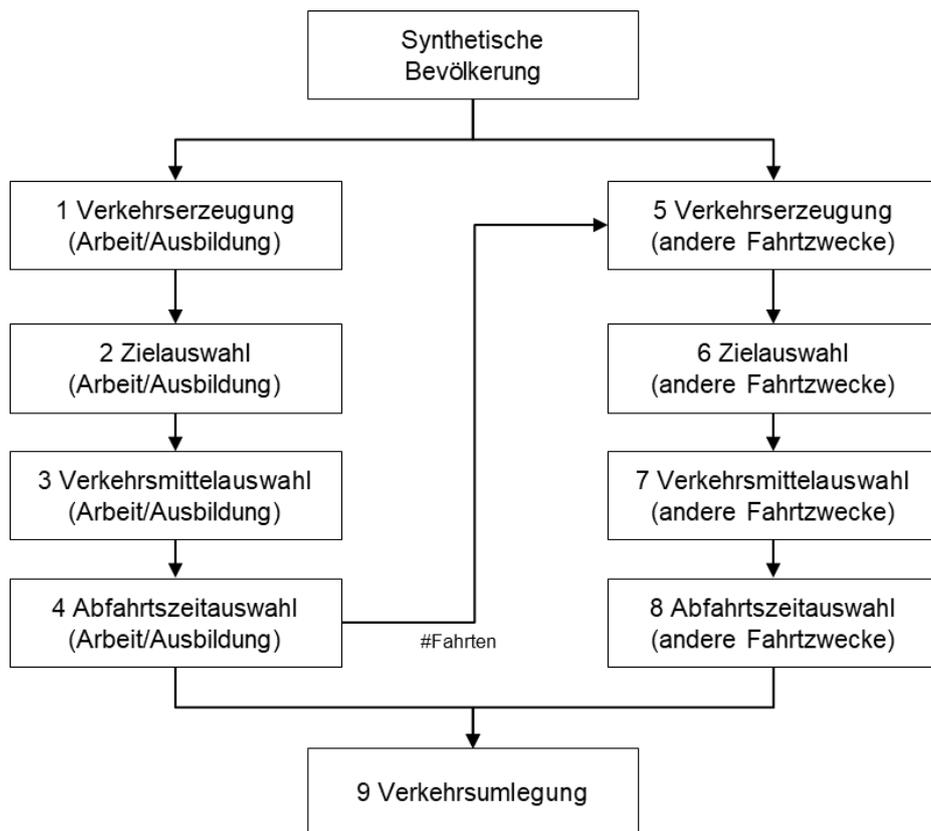
**Bild 3-15. Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Abfahrtszeit - Fernzug**

### 3.2.2. Personennahverkehr

Auch wenn der Nahverkehr nicht Schwerpunkt dieses Projektes ist, so ist die explizite Abbildung des Nahverkehrs notwendig, um den Fernverkehr richtig darzustellen. So sind zum Beispiel Stauzeiten in Großstädten, die überwiegend durch den Nahverkehr erzeugt werden, ein wichtiger Motivationsgrund für Fernreisende, nicht mit dem Auto in eine Großstadt zu fahren. Um die Wirksamkeit von Maßnahmen, die den Fernverkehr vom PKW auf andere Verkehrsmittel verlagern sollen, sinnvoll abschätzen zu können, muss der Nahverkehr hinreichend im Modell abgebildet werden.

An der TUM wurde das agentenbasiertes Verkehrsmodell MITO entwickelt (Moeckel, Kuehnel, et al. 2020), das unter anderem für die Metropolregion München (mit 4,5 Millionen Einwohnern) angewandt wird. Das Modell ist agentenbasiert, weil das Verkehrsverhalten von individuellen Personen im Modell simuliert wird. Im Gegensatz zu konventionellen Verkehrsmodellen werden hier Reisezeitenbudgets und dynamische Abfahrtszeiten simuliert. Dieses Modell wird zur Simulation der Verkehrsnachfrage in Deutschland implementiert. Dieses Modell kann die Verkehrsnachfrage für ganz Deutschland in etwa 2 Stunden berechnen.

MITO ist ein Open Source Modell, das unter <https://github.com/msmobility/mito> heruntergeladen werden kann. Bild 3-16 zeigt eine Übersicht des Modells.



**Bild 3-16. Aufbau des agentenbasierten Verkehrsmodells (die Ziffer entspricht der Reihenfolge der Submodelle)**

Weil die synthetische Bevölkerung den Arbeits- und Ausbildungsstandort als Langfristentscheidung beinhaltet, müssen für Arbeits- und Ausbildungswege keine Ziele mehr gewählt werden. Zudem beeinflussen die Anzahl und die Zeit der Arbeits- und Ausbildungswege die Anzahl von Wege für andere Zwecke. Deswegen werden erst die Arbeits- und Ausbildungswege generiert (Ziffer 1 bis 4 in Bild 3-16). Danach werden die Wege für die andere fünf Fahrtzwecke generiert: Einkaufen (Home-Based Shopping, HBS), Erholung (Home-Based Recreation), und sonstige Zwecke (Home-

Based-Other, HBO) sowie Wege, die nicht Hin- und Rückwege entsprechen (Non-Home-Based Work und Non-Home-Based Other).

Da die abhängige Variable Anzahl der Fahrten nur nichtnegative ganze Zahlen (z. B. 0, 1, 2, 3 usw.) annehmen kann, soll das Fahrtenerzeugungsmodell mit Hilfe von Zählmodellen geschätzt werden. Typische Verteilungen für Zählvariablen sind Poisson- oder negative Binomialverteilungen. Die Poisson-Verteilung setzt voraus, dass der Mittelwert des Zählprozesses gleich seiner Varianz ist (Washington, Karlaftis und Mannering 2011). Wenn die Anforderung nicht erfüllt ist, können stattdessen Negative Binomialverteilungen verwendet werden. Eine große Anzahl von Erhebungsdatensätzen mit null Fahrten könnte bedeuten, dass die Daten sowohl eine normale Zählung als auch einen Null-Zählprozess widerspiegeln. Modelle, die mit beiden Zuständen umgehen können, werden als Zero-Inflated bezeichnet (Washington, Karlaftis und Mannering 2011).

Eine vorläufige Analyse der Daten von Mobilität in Deutschland (2017) zeigte eine Überstreuung und ein eine übermäßige Anzahl von Nullen für einige Fahrtzwecke, so dass Zero-Inflated negative binomiale Regressionsmodelle ausgewählt wurden. Konkret wählten wir das Hurdle Modell (Mullahy 1986), bei dem der Null-Zählzustand mit einem binomialen Logit-Modell und der normale Zählprozesszustand mit einem abgeschnittenen negativen Binomial modelliert wird, wie in Gleichung G4 gezeigt

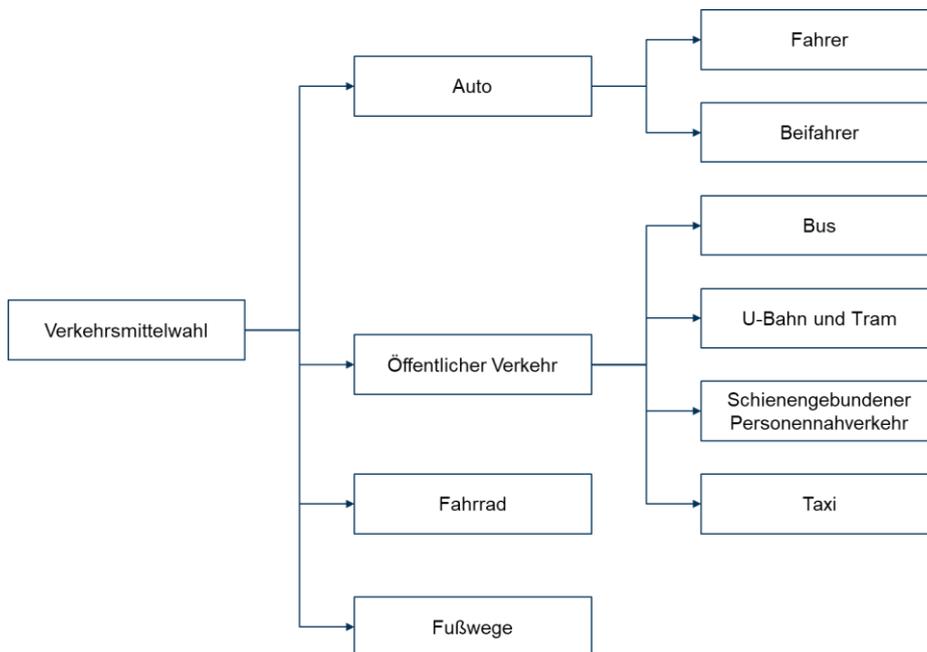
$$f_{hurdle}(y, x, \beta, \gamma) = \begin{cases} f_{binomiallogit}(0, x, \gamma) & \text{falls } y = 0 \\ \left(1 - f_{binomiallogit}(0, x, \gamma)\right) \cdot \frac{f_{negativebinomial}(y, x, \beta)}{1 - f_{negativebinomial}(0, x, \beta)} & \text{falls } y > 0 \end{cases} \quad G4$$

- $y$  ist die Anzahl von Fahrten
- $f_{hurdle}$  ist die Wahrscheinlichkeit von erzeugen Fahrten  $y$
- $f_{binomiallogit}$  ist ein binäres Logit-Modell zur Unterscheidung von keiner Fahrt und mehr als keine Fahrten
- $f_{negativebinomial}$  ist ein negatives binomiales Modell für mehr als keine Fahrten
- $\gamma$  sind die Parameter des binären Logit-Modells
- $\beta$  sind die Parameter des negativen binomialen Modells

Die Ergebnisse der Modellschätzung zeigen, dass die Höhe der Haushaltsgrößen, die Höhe des Ökonomischer Status und die Höhe der Erreichbarkeiten in der Regel zu einer höheren Anzahl an Fahrten führen. Beschäftigte und Studenten fahren öfter zur Arbeit oder zur Ausbildung.

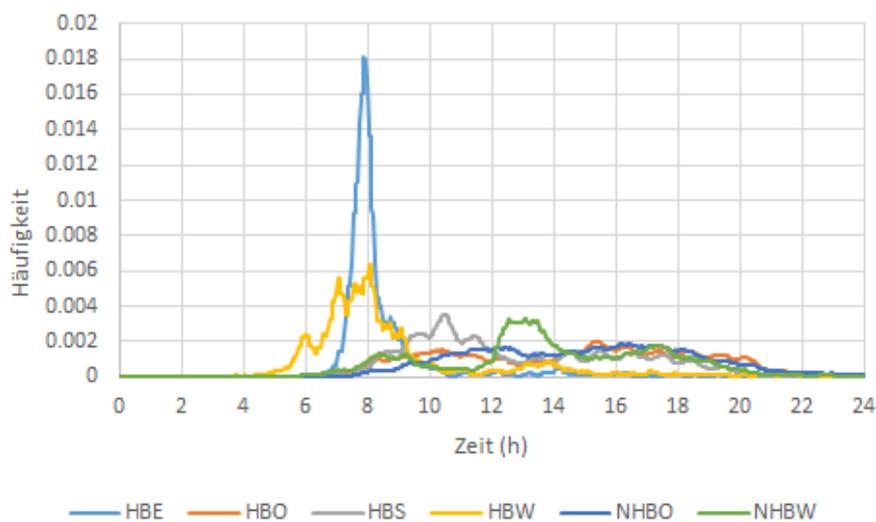
Die Fahrtenzielwahl wird im Modell entsprechend angepasst, sodass die durchschnittliche Fahrtentfernung der in der Mobilität in Deutschland beobachteten Entfernung entspricht. Für die Fahrtenzielwahl wird ein Multinomial-Logit-Wahlmodell verwendet. Mit diesem Modell wird eine Zielzone ausgewählt. Die Wahrscheinlichkeit eine Zielzone auszuwählen hängt von der Entfernung und Attraktivität ab.

Die Verkehrsmittelwahl geschieht mit einem Nested Logit Modell. [Bild 3-17](#) zeigt den Aufbau des Modells. Die Modellschätzung und die Kalibrierung von der Verkehrsmittelwahl wurde in Rahmen dieses Projekts mit den Daten der Befragung Mobilität in Deutschland 2017 aktualisiert. Distanz- und Einkommensabhängigen Zeitwerten (Value of Time) zwischen 4 €/Std und 16 €/Std werden zur Modellschätzung benutzt.



**Bild 3-17 Verkehrsmittelwahl im Personennahverkehr**

Schließlich wird die Tageszeit des Weges ausgewählt. Dazu wird die bevorzugte Ankunftszeit in Minutenauflösung simuliert, und die Abfahrtszeit durch die erwartete Reisezeit berechnet. Die Häufigkeitsverteilung der Abfahrtszeiten wurde schon von Mobilität in Deutschland berechnet. Bild 3-18 zeigt ein Beispiel.



**Bild 3-18. Häufigkeitsverteilung der Abfahrtszeit nach MiD.**

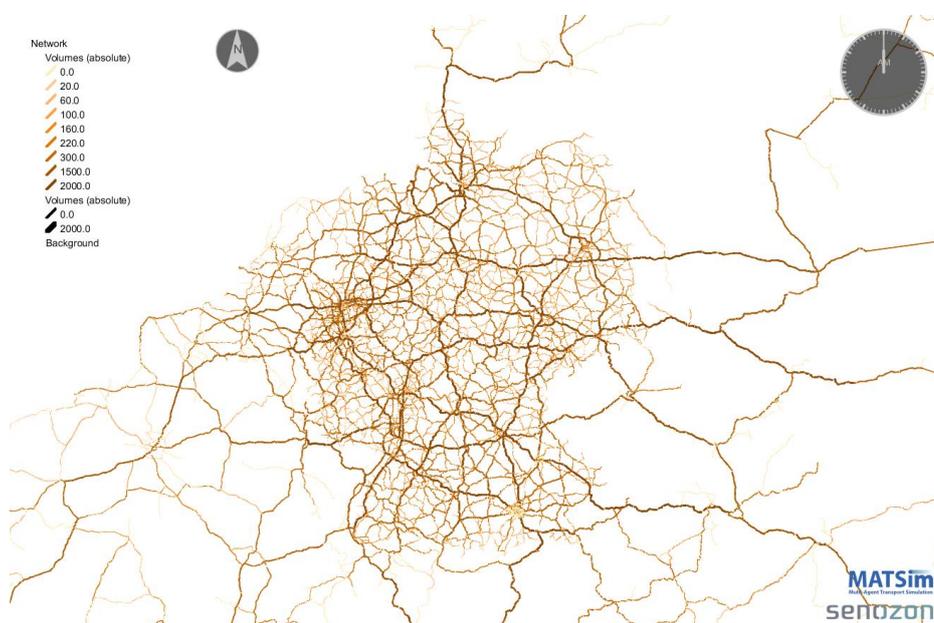
Die Verkehrsumlegung erfolgt in MATSim und wird weiter unten beschrieben.

Das MITO-Modell wurde erfolgreich auf die Bundesebene ausgedehnt, und alle für den Modelllauf erforderlichen Informationen wurden auf der Grundlage der neuesten verfügbaren Daten, einschließlich der Daten von MiD 2017 aktualisiert. Aufgrund der hohen Rechenzeiten und der benötigten Rechenleistung wurden die Stichproben von 1% bzw. 100% der Gesamtbevölkerung simuliert, was ca. 2 bzw. 140 Minuten erfordert.

### 3.2.3. Güterverkehr

Im Rahmen eines Projektes für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Förderkennzeichen: VB1806) wurde an der TUM ein multimodales Güterverkehrsmodell entwickelt. Auch wenn der Güterverkehr nicht den Schwerpunkt dieses Projektes ausmacht, sollen

Güterverkehrsströme auf der Straße in diesem Projekt abgebildet werden. 12% der Gesamtfahrleistung auf den Straßen in Deutschland wird von LKW und Sattelzugmaschinen verursacht (Umwelt Bundesamt 2020), wobei der LKW-Anteil auf Bundesautobahnen häufig deutlich höher liegt. Von 1991 bis 2017 ist die Fahrleistung des Personenverkehrs um 29% gestiegen, während der Güterverkehr um 76% zugenommen hat. Entsprechend wichtig sind die Auswirkungen des Güterverkehrs auf die Reisezeiten der PKW. Bild 3-19 zeigt die simulierten LKW-Ströme auf dem Straßenverkehrsnetz, die in diesem Projekt in der Umlegung hinzugefügt werden.



**Bild 3-19. Simulierte Güterverkehrsströme in Deutschland (erstellt mit VIA – MATSim visualizer)**

### 3.2.4. Verkehrsumlegung

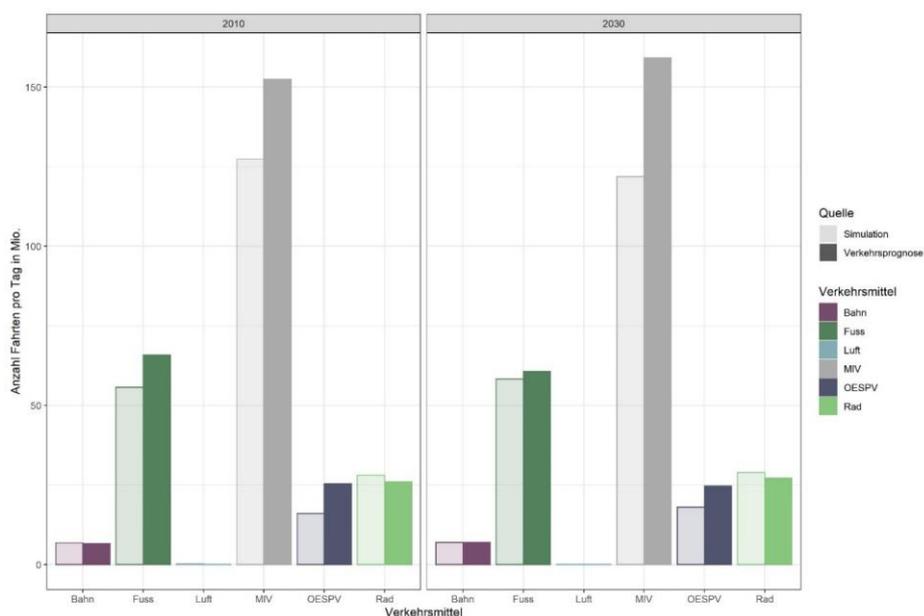
Die Umlegung der Personen- und Güterverkehrsnachfrage erfolgt mit dem agentenbasierten Modell MATSim (MATSim 2020), (HORNI, NAGEL und AXHAUSEN 2016). MATSim ist ein leistungsstarkes Verkehrsumlegungsmodell, dass in über 100 Anwendungen weltweit getestet wurde. Die Deutsche Bahn und die Schweizer Bundesbahnen betreiben die größten Anwendungen des Modells. Weil MATSim ausschließlich die Umlegung leistet und nicht die Verkehrsnachfrage erzeugt, muss MATSim mit den oben beschriebenen Verkehrsnachfragemodellen verknüpft werden.

Den Simulationen zufolge legen die Einwohner Deutschlands täglich etwa 250 Millionen Wege zurück. Ein Drittel ist nicht-motorisierter Verkehr, der zwar in MITO berechnet aber nicht in MATSim umgelegt wird. Durch Skalierung der verbleibenden Nachfrage lassen sich auch sehr große Umlagen rechnen. Die Auswirkungen der Skalierung der Nachfrage wurden bereits in anderen Szenarien von MATSim getestet (Llorca und Moeckel 2019). Bei der Skalierung wird eine kleinere Bevölkerungszahl simuliert, und die Netzkapazität wird proportional reduziert. So lassen sich ähnliche Reisezeiten berechnen wie mit der Gesamtbevölkerung, und die Rechenzeit wird erheblich reduziert.

Der Skalierungsfaktor für die Verkehrsumlegung in MATSim war 1%. Die Laufzeit der Umlegung war ca. 6 Stunden. Die Anzahl von 50 Iterationen wurde festgesetzt, so dass die Scoring-Wert der Agenten schon stabil ist (siehe Bild 3-20, die Agenten finden ab ca. Iteration 30 keine besseren Routen mehr). Die Variabilität zwischen verschiedene Modellwiederholungen wurde auch analysiert. Die Ergebnisse zeigen stabile Werte der aggregierten Indikatoren zwischen verschiedene Modellwiederholungen.

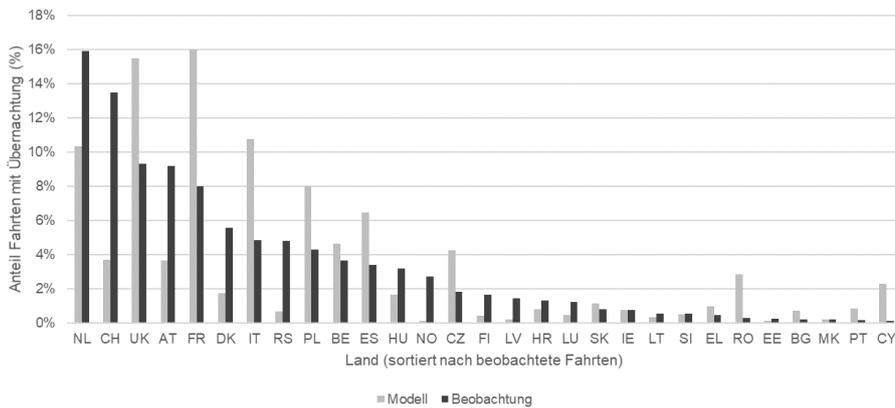


Modell vorgenommen. Der Vergleich von internationalen Fahrten ist nicht sinnvoll, da die Verkehrsprognosematrizen enthalten auch Durchgangsverkehr. Deswegen wird das nicht in die Bild dargestellt.



**Bild 3-21. Vergleich zwischen Modelergebnissen (hell) und der Verkehrsprognose (dunkel) (nur innerdeutscher Verkehr eingeschlossen)**

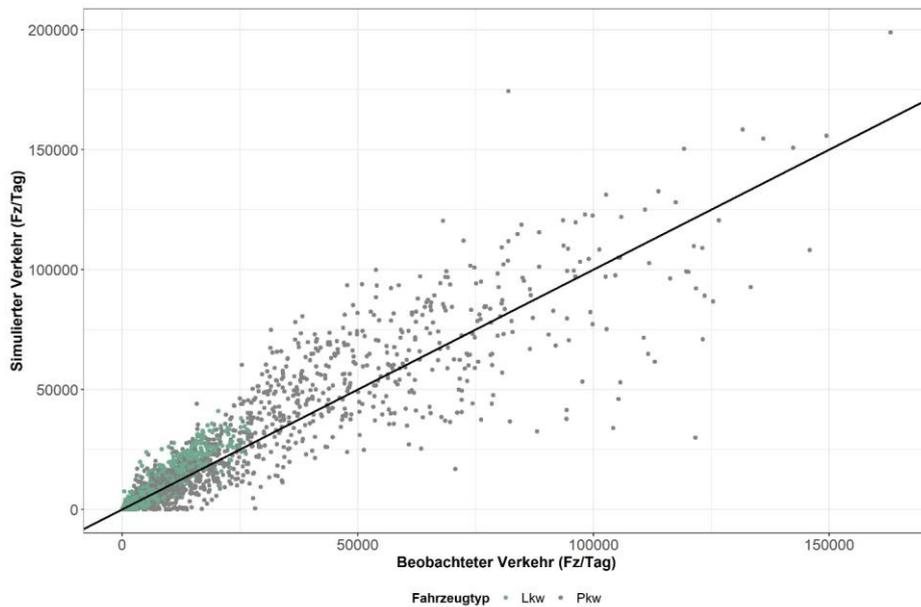
In Bezug auf internationale Fahrten wurde das Ergebniss des Modells mit Daten von Eurostats verglichen (European Commission, 2021). Der Vergleich ist nur für die Fahrten mit Übernachtung möglich (die Datenbank von Eurostat enthält keine Information über Tagesausflüge). Die [Bild 3-22](#) zeigt der Anteil von Fahrten nach Zielland binnen Europa (außer Europa stellt das Modell einzelnen Länder nicht dar). Im Allgemeinen zeigen das Modell und die Beobachtung einen ähnlichen Trend. Die Zahlen einige Länder werden nicht genau geschätzt (z.B. das Modell unterschätzt Fahrten in kleinere Länder wie Österreich und die Schweiz und überschätzt Fahrten in größere Länder wie Frankreich oder Italien). Da der Anteil von ausländischen Fahrten und sein Einfluss auf Verkehrsströme auf den Bundesstraßen gering ist (im Vergleich zu Inlandsfahrten), wurde keine Kalibrierung der Zielauswahl durchgeführt.



**Bild 3-22. Vergleich der simulierten ausländischen Fahrten mit Übernachtung zu Eurostat**

Die Ergebnisse der Verkehrsumlegung von Straßenverkehr (durchgeführt in MATSim) wurden auch mit den Verkehrszählungen auf Autobahnen und Bundesstraßen verglichen. Der Vergleich erfolgt für tägliche Zählungen, unterschieden nach leichten und schweren Fahrzeugen. Diese Validierung entspricht den Wochentagen.

Die [Bild 3-23](#) zeigt die beobachteten gegenüber den simulierten täglichen Zählungen. Diese Ergebnisse wurden durch Berechnung der RMSE Fehler nach Straßentyp und Fahrzeugtyp aggregiert. Sie sind in der Tabelle 3-19 aufgeführt.



**Bild 3-23. Agentenbasiertes Modell - Validierung der Verkehrsumlegung mit dem Vergleich zu beobachteten Verkehrszählungen**

Straßentyp	Fahrzeugtyp	Beobachtung (Fz/Tag) $\bar{\phi}$	Simulation (Fz/Tag) $\bar{\phi}$	RMSE (Fz/Tag)	RMSE (%)
Autobahn	PKW	49,117	48,168	25,868	52.7
Autobahn	LKW	10,208	12,160	6,761	66.2
Bundesstraße	PKW	12,165	8,860	10,381	85.3
Bundesstraße	LKW	1,368	991	1,449	106

**Tabelle 3-19. Vergleich zwischen beobachtete und simulierte Zählungen und Berechnung des RMSE**

Die Zählungen auf der Autobahnen A1 bis A10 wurden im Detail analysiert. Das ermöglicht die Plausibilitätsprüfung der Verkehrsumlegung. Beispielsweise zeigt die [Bild 3-24](#) die beobachteten und simulierten Verkehrsstärken aller Zählstationen. Das Modell gibt erfolgreich die Veränderung der Verkehrsstärke entlang der gesamten Länge wieder.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

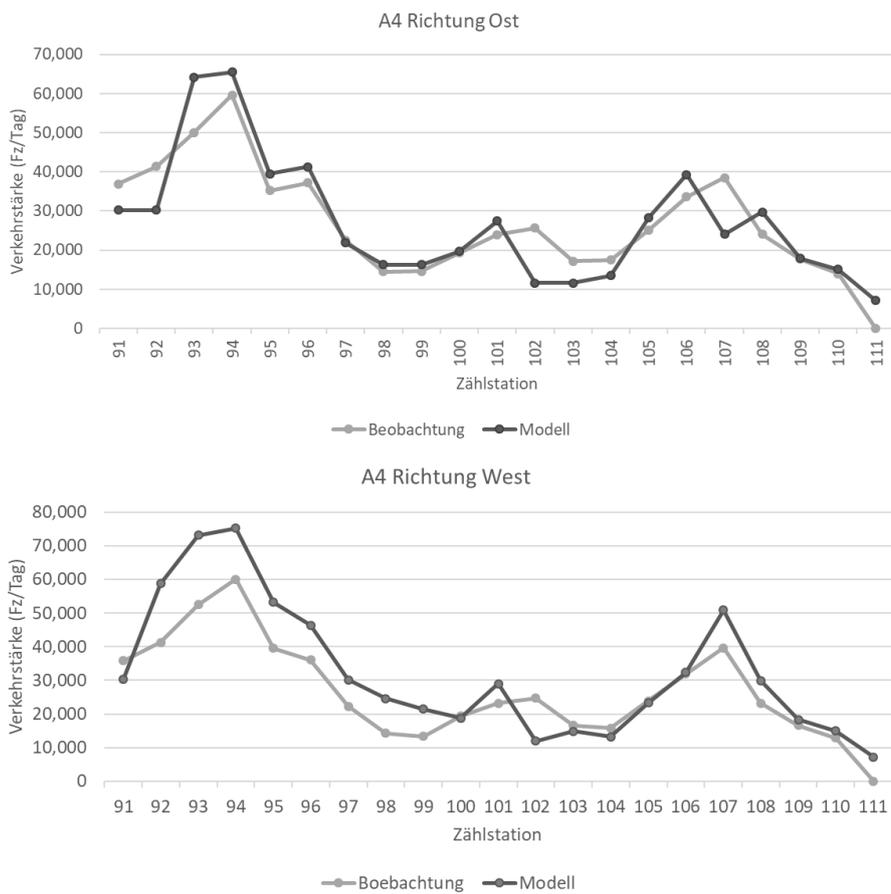


Bild 3-24. Vergleich der Zählungen auf Autobahn A4

### 3.3. Aggregiertes Netzwerkmodell

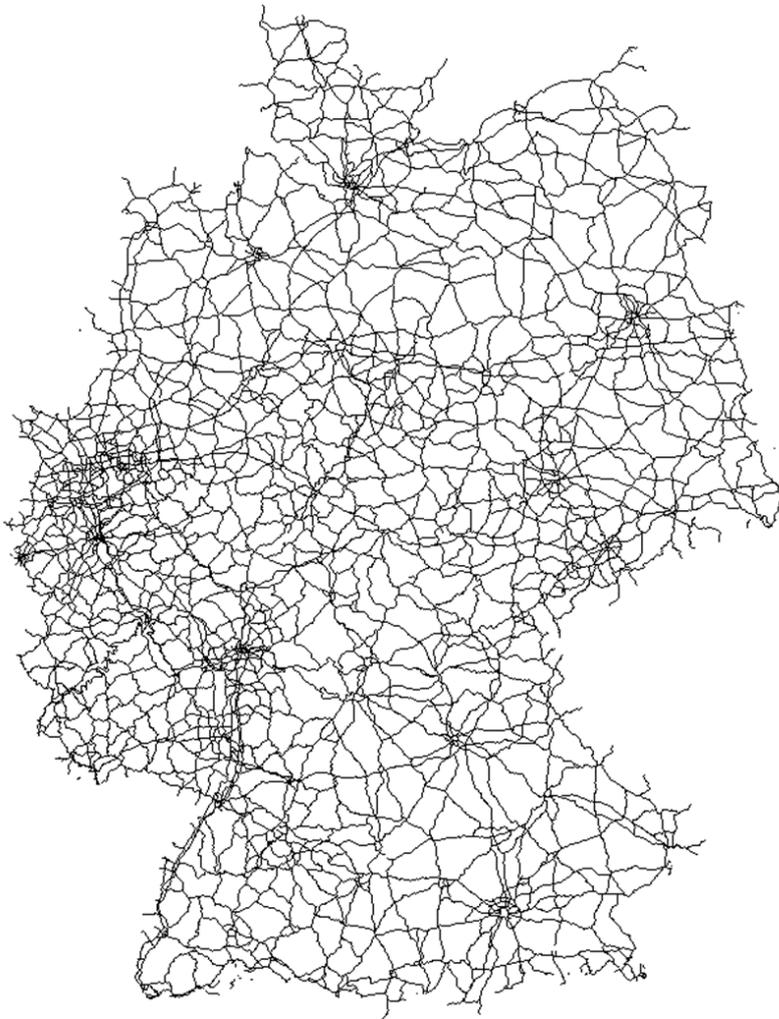
Um die Zuverlässigkeit der Modellergebnisse und damit die Glaubwürdigkeit der Erkenntnisse aus dem Projekt zu verbessern, wird zusätzlich zum agentenbasierten Modell ein zweites, reduziertes Modell entwickelt. Das aggregierte Modell beschränkt sich auf wenige Größen, bildet aber dennoch die entscheidenden dynamischen Effekte zur Bestimmung des Verkehrs auf Fernverkehrsstraßen und mögliche Verlagerungen auf das Schienennetz ab. Wichtig sind dabei im Fernstraßennetz die Fahrtkosten und Reisezeiten zwischen Ein-/Ausfahrten auf Fernverkehrsstraßen sowie die

Fahrtkosten und Reisezeiten auf der ersten und letzten Meile, also vor der Auffahrt auf die Autobahn oder Bundesstraße bzw. nach Verlassen der Autobahn oder Bundesstraße. Das gleiche gilt im Schienen- und Busnetz: hier sind die Fahrzeiten und -kosten zwischen den Stationen und für die Anfahrt zum Bahn- oder Busbahnhof bzw. die Strecke zwischen (Bus-)Bahnhof und Zielort wichtig. Zusätzlich müssen beim Schienen- und Busverkehr Zeitkosten für Umstiege entlang der Route berücksichtigt werden. Um diese Kosten je Verkehrsmodus näherungsweise darzustellen, wird ein Netzwerkgraph erstellt, der als Knoten die Ein-/Ausfahrten der Bundesfernstraßen und die (Bus-)Bahnhöfe im Bus- bzw. Schienenfernverkehr beinhaltet und deren Kanten verallgemeinerte Reisekosten je Angebot darstellen. Da Reisende ihre Fahrten für gewöhnlich nicht direkt an diesen Knoten starten, bekommen die Knoten zusätzliche Attribute, die den Anfahrts- bzw. Abfahrtsweg charakterisieren und in das Verkehrsmittelwahlmodell eingehen; diese Attribute, wie z.B. die Reisezeit zum Bahnhof, werden durch Mittelwertbildung des Einzugsgebietes generiert. Das Einzugsgebiet ergibt sich aus den Zonen des agentenbasierten Modells. Für das aggregierte Modell werden die Agenten zusammengefasst und Gruppen gebildet. Den Gruppen steht jeweils ein Knoten für den Zugang zu den verschiedenen Netzen zur Verfügung.

### 3.3.1. Aggregiertes Netzwerk: Fernverkehrsstraßen, Bahn- und Buslinien

Zur Erstellung des Straßennetzes wurden die Straßen aus Open Street Map (OSM) extrahiert. Die Straßenklasse wurde gefiltert und nur Straßen mit einem Tag "Primary" oder höher wurden für das aggregierte Netzwerk beibehalten (siehe Bild 3-25). Darüber hinaus wurden die erforderlichen "Secondary" Klassen, die als Verbindungsstücke zwischen zwei primären Straßen dienen, ebenfalls ausgewählt, um sicherzustellen, dass die Konnektivität zwischen den Pfaden nicht durch eine fehlende Verbindung gebrochen wird.

Für das Schienennetzwerk und die Buslinien von Flixbus wurden die Informationen aus der öffentlich verfügbaren GTFS Datenquelle extrahiert. Beim Schienennetzwerk werden sowohl Regionalzüge als auch Fernzüge berücksichtigt. Das heißt, dass im Vergleich zum agentenbasierten Modell das untergeordnete Straßennetz und der öffentliche Personennahverkehr bei der Simulation der Modalwahl nicht explizit modelliert werden. Im Folgenden werden Fernstraßen mit „S“ indiziert, Bahn mit „B“ und Fernbus mit „F“. Die drei Layer des Netzwerks (Gs, Gb, Gf) sind nicht miteinander verbunden. Diese Modellierung nimmt implizit an, dass Reisende das untergeordnete Netz verwenden, um von ihrem Startort in die jeweiligen Netzwerke und zu ihrem Zielort gelangen.



*Bild 3-25. Bundesfernstraßennetz (Quelle: OpenStreetMap. © OpenStreetMap-Mitwirkende)*

### 3.3.2. Verwendete Nachfragedaten

Für eine reine Modellierung des Status Quo auf dem Bundesfernstraßennetz wäre es ausreichend, die Quelle-Ziel Matrizen für die einzelnen Auf-/Abfahrten zu kennen. Für die Modellierung von Verlagerungseffekte ist die Berücksichtigung der Zu- und Abfahrten allerdings unabdinglich.

Das Modell benötigt daher räumlich aufgelöste Nachfragedaten, d.h. je Fahrt Start- und Zielkoordinaten. Hierfür werden in diesem Projekt die Fahrtdaten des agentenbasierten Modells verwendet. Alternativ könnten z.B. Mobilfunkdaten verwendet und mit Land-Use Modellen weiter disaggregiert werden.

### 3.3.3. Modellierung der Zu- und Abfahrten ins aggregierte Netzwerk

Für jeden einzelnen Reisenden können die Routen zu den jeweiligen Start- und Zielknoten der drei Netzwerk-Layer im untergeordneten Straßennetz mittels eines lokalen OSRM-Servers (was eine Routing-Engine zur Ermittlung kürzester Wege in Straßennetzen auf der Basis von OSM-Karten ist) berechnet werden<sup>1</sup>. Dabei werden die Koordinaten zunächst auf Basis des im agentenbasierten Modell definierten Zonensystems zusammengefasst. Für Bahn und Fernbus werden die Routen von den Start-/Zielkoordinaten zu den Koordinaten der geometrisch nächstgelegenen Bahn/Fernbus-Haltestelle berechnet. Für das Straßennetz wird die gesamte Route von den Start- zu den Zielkoordinaten mittels OSRM berechnet und anschließend überprüft, ob die Route das Fernstraßennetz beinhaltet und die jeweiligen Auf- und Abfahrten bestimmt. Wenn die OSRM Route eines Reisenden das Fernstraßennetz nicht verwendet, kann diese Fahrt für dieses Projekt ignoriert werden. Die Routen im OSRM-Server werden auf Basis der vollständigen Detailkarte von OSM berechnet, die alle Straßen einschließlich der "Residential" enthält. Dies ist wichtig für die Berechnung der Reisezeit von zu Hause bis z.B. zum Bahnhof oder zum Eintrittspunkt in das Bundesstraßennetz. Bei der Verwendung von OSRM werden für diese Strecke die Fahrzeiten im freien Verkehr verwendet.

Um Verlagerungseffekte messbar zu machen, werden die Quelle-Ziel Matrizen der drei unabhängigen Verkehrsmittel (PKW, Bus und Bahn) über die Zu- und Abfahrten miteinander verwoben. Der Flugverkehr wird im aggregierten Modell nicht berücksichtigt, da hier keine bedeutenden Verlagerungseffekte zu erwarten sind. Jeder Startpunkt ist mit jeweils einem Knoten

---

<sup>1</sup> Um den Rechenaufwand geringerer zu halten, wurde zunächst geplant, die Zu- und Abfahrten über die euklidische Distanz und Geschwindigkeitsschätzungen zu ermitteln. Benchmarking hat ergeben, dass die Routen auf dem untergeordneten Netz explizit berechnet werden können.

der drei Netzwerke verbunden und kann damit durch ein Tripel  $O^v = (O_s, O_b, O_f)$  sowie den jeweiligen Distanzen zu den Knoten beschrieben werden. Analoges gilt für jeden Zielpunkt, welcher durch Tripel  $D^v = (D_s, D_b, D_f)$  und die jeweiligen Distanzen beschrieben wird. Knoten der einzelnen Netzwerke werden daher nur in Tripel verbunden, falls sie mögliche Optionen für eine Verlagerung darstellen (siehe Bild 3-26).

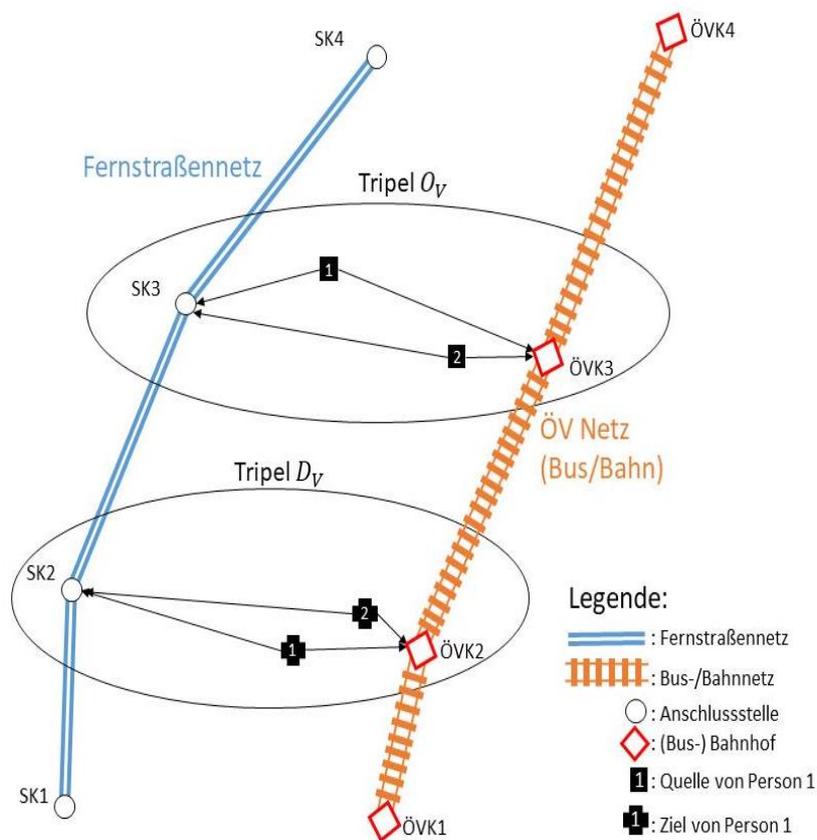
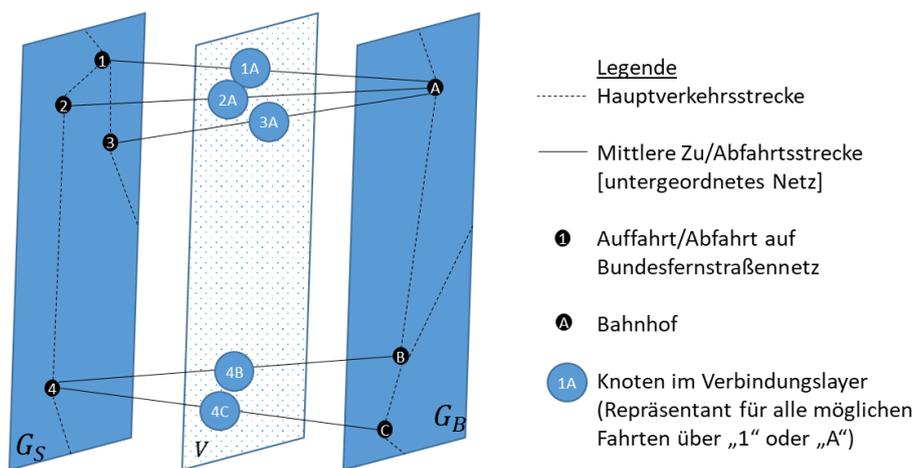


Bild 3-26. Vorgehen zur Erstellung von Tripel  $O^v$  und  $D^v$ .

### 3.3.4. Aggregation und Kosten des Verbindungslayers

Die so erstellten Tripel verbinden die drei Netzwerke und können als Knoten  $N_v$  eines vierten „Verbindungslayers“  $V$  definiert werden. Dieser Layer enthält nur Knoten und Kanten zu den anderen Ebenen, aber keine direkten Verbindungen zwischen Knoten des Layers. Bild 3-27 illustriert das dargestellte Netzwerk (vereinfacht nur mit  $G_S$  und  $G_B$ ). Die Nachfrage des aggregierten Netzwerkmodells wird auf den Knoten dieses Layers definiert, so dass sie die verschiedenen Modi zur Verfügung haben.



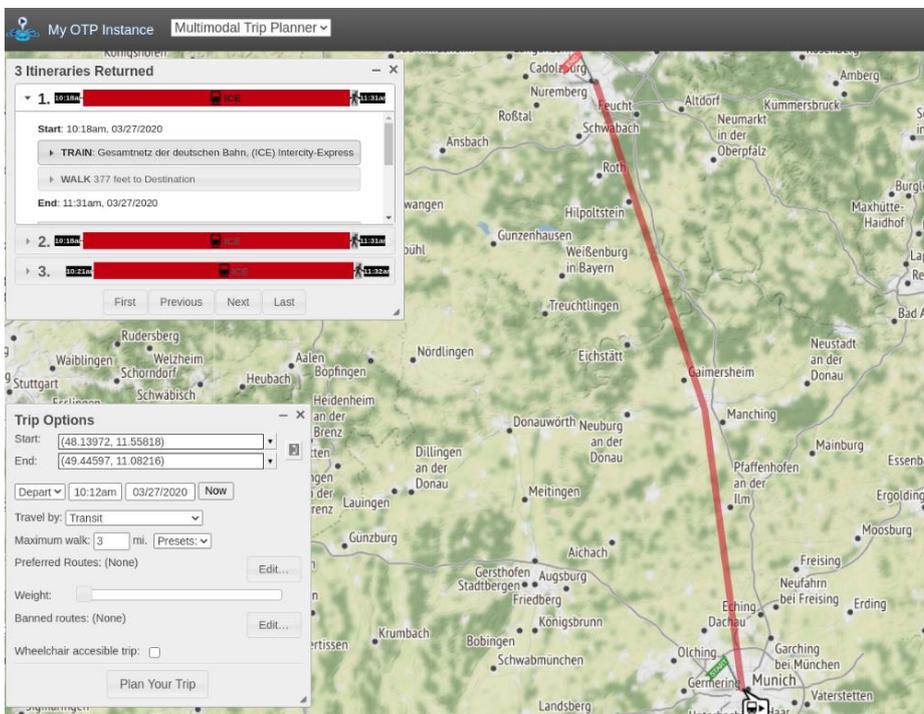
**Bild 3-27. Vereinfachte Darstellung des Graphen im aggregierten Netzwerkmodell**

Zur Bestimmung der mittleren An-/Abfahrtskosten sollten auf der Flächennutzung basierende Modelle die beste Grundlage bieten, mit deren Hilfe sich für jedes Tripel die Einzugsgebiete und die gewichteten mittleren Zufahrtslängen bestimmen lassen. Die Fahrten werden auf die jeweiligen Zu-/Abfahrten gematcht und mit OSRM die jeweiligen Distanzen und Fahrtauern ermittelt.

Zusammen mit einer zeitlichen Aggregation auf Stundenscheiben werden dadurch Quelle-Ziel Matrizen  $M(O_v \rightarrow D_v, t)$  erstellt. Bei dieser Aggregation können die gewichteten mittleren Anfahrts-/Abfahrtswege je Modus bestimmt werden und als Kosten zwischen den Verbindungsknoten  $N_v$  und den jeweils zugehörigen Knoten  $N_s$ ,  $N_B$ , und  $N_F$  auf den jeweiligen Kanten aufgebracht werden. Dadurch werden die Knoten  $N_v$  zu Repräsentanten für alle Zu-/Abfahrten zu den jeweiligen Auf-/Abfahrten des Bundesfernstraßennetzes und den nächstgelegenen Haltestellen.

### 3.3.5. Modellierung von Modal Split und Belastung der Bundesfernstraßen

Verlagerungseffekte ergeben sich durch eine veränderte Modalwahl, welches der Wahl einer Route über eine der drei mögliche Layer ( $G_s$ ,  $G_B$ ,  $G_F$ ) in diesem Netzwerk entspricht. Dafür sind neben den bereits beschriebenen Zufahrtskosten auch die Wege auf den Hauptstrecken in den drei Netzwerkebenen notwendig. Für Bahn und Fernbus werden aus den GTFS Daten die Reisezeiten zwischen den jeweiligen Start und Endhaltestellen mittels eines lokalen OpenTripPlanner-Servers bestimmt (siehe Bild 3-28).



**Bild 3-28. Anfrage der Verbindung zwischen zwei Bahnhöfen im lokalen OpenTripPlanner Server (erstellt mit OpenTripPlanner)**

Da Stauereffekte die Reisezeiten auf dem Fernstraßennetz beeinflussen, wird das restliche Modell in einem iterativen Simulationsframework dargestellt. Das gesamte Framework wird in [Bild 3-29](#) skizziert, in dem auch die Schritte der iterativen Simulation im unteren Teil durch die horizontale Trennung erkennbar sind. SUMO wird als Simulationssoftware verwendet.

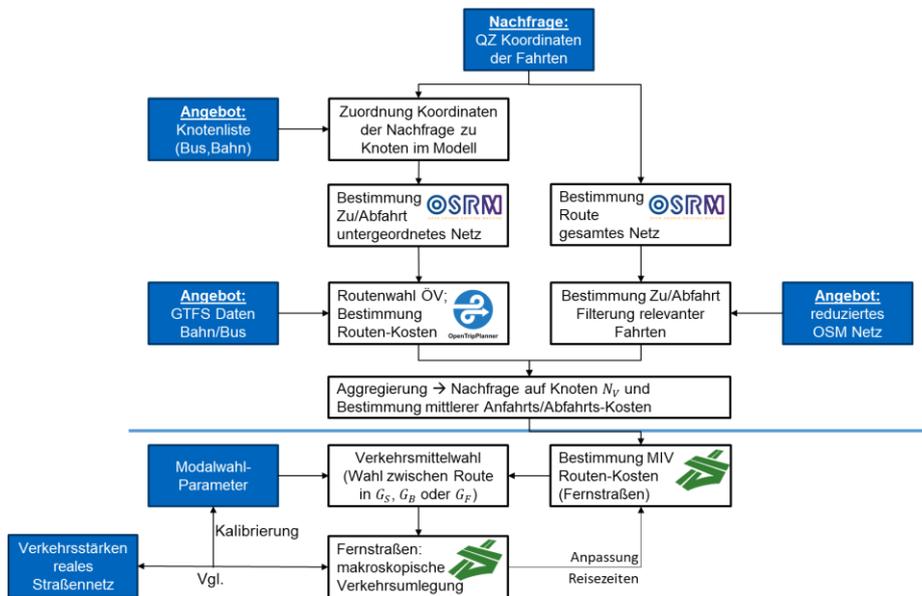


Bild 3-29. Komplette Prozessdarstellung im Aggregierten Netzwerkmodell

Die Reisezeiten, die für die jeweiligen Quelle-Ziel Verbindungen auf den Fernstraßen vom makroskopischen Modell von SUMO bestimmt werden, stellen den letzten Baustein für die Modalwahl/Routenwahl im Netzwerk mit den drei Ebenen für die Verkehrsmodi dar. Diese Wahl wird im Gegensatz zum agentenbasierten Modell für alle Reisenden, die durch einen Eintrag in der OD Matrix  $M(O^v \rightarrow D^v, t)$  repräsentiert werden, auf einmal vorgenommen, so dass sich die Nachfrage für das Bundesfernstraßennetz aus der Gesamtnachfrage wie folgt ergibt:

$$M(O_S \rightarrow D_S, t) = \sum_{O^V \in O_S^V} \sum_{D^V \in D_S^V} p(O^V \rightarrow D^V \text{ via } G_S) \cdot M(O^V \rightarrow D^V, t) \quad G5$$

wobei

- $M(O_S \rightarrow D_S, t)$  die PKW-Reisen von der Quelle zum Ziel zum Zeitpunkt t sind
- $O^V$  die Quelle im Verbindungslayer

- $D^V$ : das Ziel im Verbindungslayer
- $p(O^V \rightarrow D^V \text{ via } G_S)$ , die Wahrscheinlichkeit, den PKW von der Quelle bis zum Zielort zu benutzen beschreibt und
- $M(O^V \rightarrow D^V, t)$ : alle Fahrten vom Ausgangsort zum Zielort zum Zeitpunkt  $t$  beinhaltet.

Die Wahrscheinlichkeiten  $p(O^V \rightarrow D^V \text{ via } G_S)$  können für jedes einzelne OD-Paar getrennt berechnet werden. Hierfür wird ein multinomiales Logit Modell verwendet, welches sowohl die Hauptverkehrsstrecke als auch die Zu- und Abfahrt berücksichtigt:

$$p(O^V \rightarrow D^V \text{ via } G_S) = \frac{\exp[U_S]}{\exp[U_S] + \exp[U_B] + \exp[U_F]} \quad G6$$

$$p(O^V \rightarrow D^V \text{ via } G_B) = \frac{\exp[U_B]}{\exp[U_S] + \exp[U_B] + \exp[U_F]} \quad G7$$

$$p(O^V \rightarrow D^V \text{ via } G_F) = \frac{\exp[U_F]}{\exp[U_S] + \exp[U_B] + \exp[U_F]} \quad G8$$

Wobei

- $U_S$  der Nutzen für den Modus PKW ist,
- $U_B$  den Nutzen für den Fernzug ist und
- $U_F$  den Nutzen für den Fernbus darstellt.

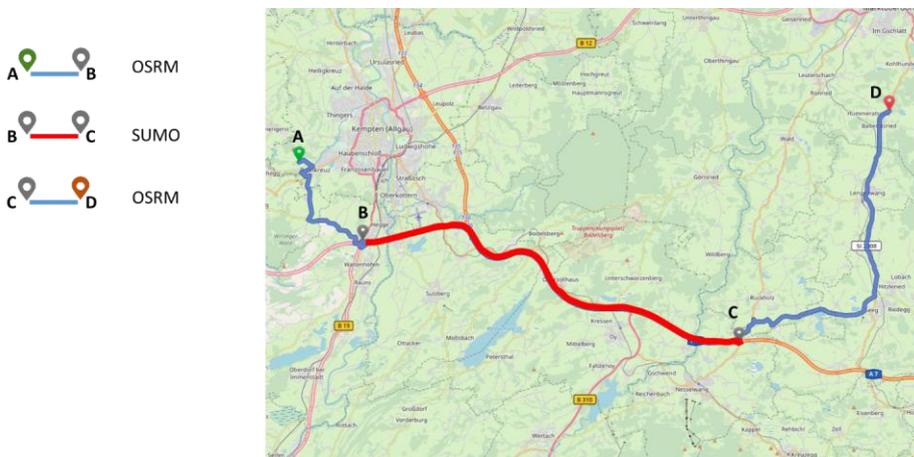
Der Nutzen einer Route über das Bundesfernstraßennetz wird wie folgt bestimmt:

$$U_S = \alpha(c_d \cdot (d[O_V \rightarrow O_S] + d[O_S \rightarrow D_S] + d[D_S \rightarrow D_V]) + c_t \cdot (t[O_V \rightarrow O_S] + t[O_S \rightarrow D_S] + t[D_S \rightarrow D_V])) \quad G9$$

Wobei

- $d[.]$ : die Distanz der Route von  $O \rightarrow D$
- $t[.]$ : die Reisezeit der Route von  $O \rightarrow D$
- $c_d$ : die distanzabhängigen Betriebskosten

- $c_t$ : der Wert der Zeit (Value-of-Time)
- $\alpha$ : ein negativer Koeffizient der generalisierten Kosten, der die Skalierung eines Geldwertes vornimmt und festlegt, wie negativ die Kosten die Modalwahl beeinflussen.



**Bild 3-30. Auftrennung der MIV Route: untergeordnete Teile werden in OSRM einmal bestimmt, während der Teil auf der Bundesfernverkehrsstraße Teil der SUMO Simulation ist (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)**

Bei der Bestimmung der Nutzen für Bahn und Fernbus wird berücksichtigt, dass der Fahrtpreis sich nicht linear mit der Fahrtstrecke vergrößert, sondern der Verteilung folgt (Bild 3-30). Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass der PKW nicht gleichzeitig zur Zu- und zur Abfahrt als Hauptverkehrsmittel zur Verfügung steht.

In diesem vereinfachten Modell können die Reisenden für die Zu- und Abfahrt zum/vom nächsten Haltepunkt von Bahn oder Fernbus entweder den PKW oder den öffentlichen Verkehr nutzen. Basierend auf den Daten der Mobilitätsbefragung MiD verwenden durchschnittlich 62% der Befragten für solche Fahrten den PKW und 38% die öffentlichen Verkehrsmittel. Ebendiese Anteile werden im Modell bei der zufälligen Zuweisung der Personen zu den Zu- und Abfahrtsmodi gewählt. Der Nutzen wird über die folgende Funktion bestimmt:

$$U_{B/F} = \alpha \cdot \left( \beta_{B/F} + f_r(d[O_V \rightarrow O_{B/F}]) + C_{B/F}(d[O_{B/F} \rightarrow D_{B/F}]) + f_r(d[D_{B/F} \rightarrow D_V]) + c_t \cdot (\gamma_r \cdot t[O_V \rightarrow O_{B/F}] + t[O_{B/F} \rightarrow D_{B/F}] + \gamma_r \cdot t[D_{B/F} \rightarrow D_V]) \right) \quad G10$$

Wobei:

- $\beta_B/\beta_F$ : spezifische Konstanten („Intercept“) sind und
- $f_r$  für die Zufallsfunktion steht und folgendermaßen definiert ist:

$$f_r = \begin{cases} c_d & \text{falls Pkw(62\%)} \\ c_B & \text{falls OPNV(32\%)} \end{cases} \quad G11$$

- $\gamma_r$  ist der Faktor der veränderten Reisezeit im öffentlichen Verkehr im Vergleich zum PKW beschreibt.

Nachdem auf diese Weise die Nachfrage für das Bundesfernstraßennetz  $M(O_S \rightarrow D_S, t)$  für alle Zeitscheiben berechnet wurde, folgt anschließend noch eine makroskopische Umlegung in SUMO.

Nach der Umlegung können die Reisezeiten auf dem Bundesfernstraßennetz mit den Reisezeiten aus der vorigen Umlegung verglichen werden, um eine konsistente Abschätzung der Reisekosten in der Modalwahl zu gewährleisten. Dazu wird die Summe aller Fahrten auf dem Bundesfernstraßennetz nach G12 berechnet.

$$TT^U = \sum_t \sum_{O^V} \sum_{D^V} M(O_S \rightarrow D_S, t) \cdot t^U[O_S \rightarrow D_S] \quad G12$$

mit:

- $t^U[O_S \rightarrow D_S]$ , der Reisezeit von der Quelle zum Ziel im freien Verkehr

und mit dem entsprechenden „erwarteten“ Wert nach G13 mit den in die Modalwahl eingehenden Reisezeiten verglichen.

$$TT^E = \sum_t \sum_{O^V} \sum_{D^V} M(O_S \rightarrow D_S, t) \cdot t[O_S \rightarrow D_S] \quad G13$$

Wenn die Bedingung

$$\frac{TT^U - TT^E}{TT^E} \leq \epsilon$$

G14

Mit:

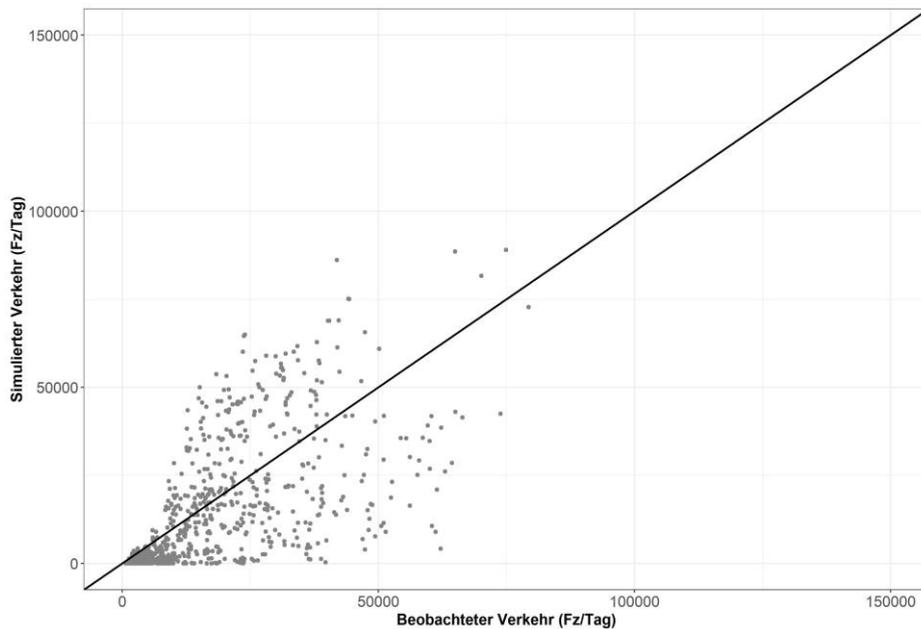
- $\epsilon$ , dem Kriterium zur Begrenzung der Iterationen

nicht erfüllt ist, wird eine neue Iteration der MIV Routenkostenbestimmung, Modalwahl und Umlegung gestartet. Wenn die Bedingung erfüllt ist, gilt das Szenario als berechnet.

Zur Kalibrierung des Modells werden die Modalwahlparameter  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  variiert und der Root Mean Square Error der Verkehrsstärken der Umlegung mit den Verkehrszählungen der BAST minimiert.

### 3.3.6. Modellvalidierung

Zur Validierung des aggregierten Modells wurden die Simulationsdaten mit den Werten aus den Zählstellen verglichen. Bild 3-31 zeigt Gegenüberstellung der Zählwerte zu den Messwerten aus der Simulation.



**Bild 3-31: Aggregiertes Modell – Validierung der Verkehrsumlegung mit dem Vergleich zu beobachteten Daten aus Verkehrszählungen**

Die Tabelle 3-20 gibt einen Überblick über die durchschnittlichen Werte und Kenngrößen zur Gütebewertung. Im aggregierten Modell wurden nur PKW betrachtet, die LKW fehlen hier.

Straßentyp	Fahrzeugtyp	Beobachtung (Fz/Tag) $\bar{\phi}$	Simulation (Fz/Tag) $\bar{\phi}$	RMSE (Fz/Tag)	RMSE (%)
Autobahn	PKW	24.684	23.656	19.028	77,1
Bundesstraße	PKW	5.047	1.402	4.630	91,8

**Tabelle 3-20. Aggregiertes Modell - Vergleich zwischen beobachteten und simulierten Zählungen und Berechnung des RMSE**

Im Vergleich zum agentenbasierten Modell sind hier größere Fehler zu verzeichnen. Da das aggregierte Modell nicht so detailliert ist, ist es jedoch auch zu erwarten, dass diese mikroskopischen Parameter im Modell nicht genau wiedergegeben werden können. Insbesondere starten und enden Fahrten in diesem Modell nicht am spezifischen Ort, sondern werden in den entsprechenden Zonen aggregiert.

## 3.4. Szenarien

Im Rahmen dieses Projektes fand am 5. Februar 2020 in den Gebäuden des BMVI in Berlin ein Workshop mit verschiedenen Interessensvertretern und Unternehmen zur Entwicklung und Diskussion realistischer Szenarien statt. Beteiligt waren das BMVI, die BAST, RegioConsult, Bauhaus Luftfahrt e.V., Sixt SE, der Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e. V., ioki GmbH, FlixBus, der Bundesverband CarSharing e.V. des Verkehrsclub Deutschland, BMW Group und MOIA GmbH. Auf Basis der Vorschläge und Machbarkeitsbetrachtungen im Sinne der realistischen Bild in der Simulation sowie unter Berücksichtigung der Diskussionen und Prioritäten, die sich aus dem Stakeholder-Workshop ergeben haben, wurden die erste sechs Szenarien für die Untersuchung im Projekt definiert. Ein weiteres Szenario (Szenario 7) wurde nach dem zweiten Stakeholder-Workshop umgesetzt. Ziel des Workshops war es, den Beteiligten und dem Ministerium die Ergebnisse des Projekts zu präsentieren. Der Workshop war virtuell und fand am 8. November 2021 statt. Die Teilnehmer von das BMVI, die BAST, RegioConsult, Bauhaus Luftfahrt e.V., dem Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e. V., FlixBus und MOIA GmbH beteiligten sich aktiv an der Diskussion der Ergebnisse.

### 3.4.1. Szenario 1: Verbesserung der lokalen Anbindung an die Bahn durch nachfrageorientierte Mobilitätssysteme

Durch Automatisierung und Digitalisierung besteht die Chance, den öffentlichen Zubringerverkehr vor allem in ländlichen und vorstädtischen Regionen deutlich zu verbessern und damit den öffentlichen Schienenverkehr attraktiver zu machen. Ebenso können On-Demand Systeme Verbesserungen im städtischen Bereich hervorrufen, da sie einerseits den PKW Besitz und damit auch Gelegenheitsfahrten auf den Fernstraßen reduzieren, andererseits aber auch die Anfahrt/Abfahrt zum/von Bahnhof attraktiver gestalten könnten.

Aufgrund wirtschaftlicher Faktoren ist die Qualität, die ein Betreiber anbieten kann, von der Nachfragemenge abhängig. Andererseits ist aber die Nachfrage wiederum von der Qualität des On-Demand Angebots abhängig. Auf Basis von einigen soziodemografischen und geografischen Kenngrößen, die auch in das agentenbasierte Modell einfließen, sollen anhand von Beispielregionen betrieblich sinnvolle mittlere Servicequalitäten eines Zubringerservices abgeleitet werden.

In diesem Szenario wird die Nachfrage nach Ridepooling in Regionen mit unterschiedlichen Bevölkerungsstrukturen und die daraus resultierenden Entlastungseffekte für das Fernstraßennetz

abgeleitet. Abgebildet wird dies über die Einführung von Ridepooling aber ohne Koordinierung von Fahrten, die Passagiere von/zum nächsten Haltepunkt des öffentlichen Verkehrs befördern.

Die Preise wurden auf Basis von Erfahrungswerten von bereits existierenden Services ausgewählt (Tabelle 3-21). Erste Projekte, in denen Ridesharing-Angebote eingeführt wurden, die Fahrten von Passagieren intelligent bündeln und so ein Angebot zu Zeiten oder in Regionen schaffen, in denen der öffentliche Nahverkehr ansonsten keine Alternative bietet, sind zum Beispiel in Berlin, Hamburg oder München eingeführt worden.

In Hamburg wird für die Nutzung des Service lediglich ein Komfortzuschlag von 1€ erhoben (Szenario 1\_A\_1). In München gibt es verschiedene Angebote dieser Art. Der sog. ParkstadtTiger bedient ein bestimmtes Gebiet von München und arbeitet mit einem Pauschalpreis von 3,30€ pro Fahrt (Szenario 1\_A\_2). Andere Angebote errechnen die Fahrpreise distanzabhängig. In München befindet sich der IsarTiger in einer Testphase mit sehr geringen Preisen von 0,02€ Fixpreis und 0,02€/km, da die Wirtschaftlichkeit des Angebots in dieser Phase noch nicht im Vordergrund steht. In Szenario 1\_B\_1 werden distanzabhängige Preise von 0,12€/km angenommen. Dies entspricht den Preisen des öffentlichen Verkehrs aus MITO. In Berlin wird für den BerlKönig ein Preis von 1,50€/km erhoben, auch diese Variante wird mit Szenario 1\_B\_2 nachgebildet.

Das am häufigsten verwendete Preismodell für Services solcher Art besteht aus einem fixen Anteil und einem variablen, distanzabhängigen Anteil. Um einen Service anzubieten, der auch wirtschaftlich tragbar ist, werden in den Szenarien 1\_C Preise angenommen, die den heutigen Preisen für Taxifahrten entsprechen. Auch hier gibt es verschiedene Varianten: Szenario 1\_C\_1 stellt einen sehr günstigen Service dar, 1\_C\_2 bildet Preise von Taxi Service wie beispielsweise in Heidelberg oder Frankfurt/Oder ab und Szenario 1\_C\_3 einen teureren Service wie beispielsweise in Düsseldorf. Auf eine Staffelung der Kilometerpreise, wie es häufig in Taxiservices der Fall ist, wurde verzichtet. Als Referenz wird zusätzlich ein gratis Service (Szenario 1\_A\_0) betrachtet.

Variante	Code	Fixpreis (€)	Preis pro km (€/km)
Fixpreis	1_A_0	0,00	0,00
	1_A_1	1,00	0,00
	1_A_2	3,30	0,00
Preis pro km	1_B_1	0,00	0,12
	1_B_2	0,00	1,50
Fixpreis + Preis pro km	1_C_1	1,00	0,12
	1_C_2	2,80	1,60
	1_C_3	4,50	2,60

**Tabella 3-21. Szenario 1 - Varianten**

### 3.4.2. Szenario 2: Erweiterung des Fernbusnetzes und Anpassung der Besteuerung

Das deutsche Fernbusnetz ist in den vergangenen Jahren stark ausgebaut worden, sodass mittlerweile ein dichtes Netz hochfrequenter Verbindungen zwischen größeren deutschen Städten besteht. Das Potenzial zum weiteren Ausbau ist hier weitestgehend erschöpft. In ländlichen Regionen besteht allerdings noch Potenzial zum Ausbau des Fernbusnetzes, wobei zu beachten ist, dass die Einrichtung eines Linienverkehrs nur bei konstant hoher Nachfrage wirtschaftlich ist. In Regionen, in denen die Nachfrage schwankt und generell geringer ausfällt, bieten sich bedarfsorientierte Angebote an.

Da keine einzelnen Fernbusstrecken im Detail im Modell betrachtet werden, wird hier eine generelle Verbesserung des Service angenommen. Das bedeutet, dass die Reisezeiten der Fernbusverbindungen im Modell in diesem Szenario reduziert werden. Dazu wurde zunächst die Servicequalität der Fernbusverbindungen auf den verschiedenen Strecken analysiert. Solche mit niedriger Qualität im Sinne der Reisezeiten wurden dann auf das Niveau der Strecken mit hoher Servicequalität gehoben. Das Berechnungsprozess wird in Abschnitt [049](#) beschreibt.

Ein weiterer Aspekt, der in diesem Szenario betrachtet wird, ist die Anpassung des Steuersatzes für Fernbusreisen. Während in Deutschland im ÖPNV ein ermäßigter Steuersatz von 7% gilt und dieser seit 1.1.2020 auch für Fernreisen mit der Deutschen Bahn gilt, werden für Fernreisen mit dem Bus 19% Mehrwertsteuer (vom 1.7.2020 bis 31.12.2020 16%) erhoben. In diesem Szenario wird ermittelt, welche Wirkung eine Anpassung des Steuersatzes für Fernbusreisen von 19% auf 7% hat. Die verminderte Besteuerung bewirkt eine Reduktion des Preises für die Reisenden.

In den drei betrachteten Varianten dieses Szenarios werden zunächst die Effekte der Preisreduktion und Reisezeitverminderung einzeln analysiert und in einem dritten Szenario die Änderungen gemeinsam implementiert (Tabelle 3-22).

Variante	Code	Änderung des Preises	Änderung der Servicegeschwindigkeit
Steuersenkung	2_A_1	ja	nein
Geschwindigkeitssteigerung	2_A_2	nein	ja
Steuersenkung + Geschwindigkeitssteigerung	2_A_3	ja	ja

*Tabelle 3-22. Szenario 2 - Varianten*

### 3.4.3. Szenario 3: Deutschlandtakt im Bahnverkehr und Koordinierung mit dem ÖPNV

Durch das vom BMVI geförderte Projekt „Deutschland-Takt“ wurden Maßnahmen untersucht, die dafür sorgen sollen, dass das Bahn-Gesamtnetz für den Fernverkehr wesentlich attraktiver wird. Durch eine gute Taktung von Zugverbindungen sollen längere Wartezeiten an Umsteigebahnhöfen reduziert werden, außerdem soll die Reisezeit insgesamt durch mehr Verbindungen, optimierte Anschlüsse und modernisierte Strecken verkürzt werden. Die Pläne für den sog. Zielfahrplan 2030 (BMVI, 2021) befinden sich noch in der Bearbeitung, erste Entwürfe gibt es aber bereits. Im Modell kann dies auf Basis der Entwürfe und weiterer Annahmen abgebildet werden. Ziel des Fahrplans ist es, nicht nur die Anschlüsse im Fern- und Regionalverkehr der Bahn attraktiver zu gestalten, sondern auch den öffentlichen Personennahverkehr entsprechend anzupassen. Damit ließen sich möglicherweise auch Vorteile für den Güterverkehr erzielen. Für die Fahrgäste bedeutet dies geringere Reisezeiten, weniger Umsteigezeiten sowie ein verbessertes Angebot auf Hauptachsen durch eine Verkürzung der Taktzeiten. Dies kann zu einer induzierten Nachfrage des verbesserten Bahn-Angebots führen und die Fernverkehrsstraßen entlasten.

Im Modell wurden verschiedene Annahmen getroffen, die die reduzierten Fahr- und Umsteigezeiten darstellen (Tabelle 3-23). Da im Modell nicht alle einzelnen Änderungen im Streckennetz betrachtet werden können, wurde die Fahrzeit pauschal bei allen Fahrten im Bahnfernverkehr prozentual reduziert. In den verschiedenen Varianten des Szenarios wurden Fahrzeitreduktionen von 10%, 30% bzw. 50% gewählt. Die Umsteigezeiten wurden ebenso pauschal um 5 oder 10 Minuten verringert. Im agentenbasierten Modell ist es auf Grund der Modellstruktur nicht möglich auch die Umsteigezeiten prozentual zu verändern, im aggregierten Modell jedoch schon. Daher wurden im

aggregierten Modell zusätzliche Varianten des Szenarios analysiert, in denen die Umsteigezeiten prozentual um 30 und 50% reduziert wurden.

Variante	Code	Änderung der Reisezeit	Änderung der Umsteigezeit
Geringe Änderung der Reisezeit	3_A_1	10%	5 min/Umstieg
	3_A_2	10%	10 min/Umstieg
Mittlere Änderung der Reisezeit	3_B_1	30%	5 min/Umstieg
Große Änderung der Reisezeit	3_C_1	50%	5 min/Umstieg
Prozentuale Änderung von Reise- und Umsteigezeit	3_D_1	10%	30%
	3_D_2	10%	50%

*Tabelle 3-23. Szenario 3 - Varianten*

#### 3.4.4. Szenario 4: Einführung einer entfernungsabhängigen Maut

Seit 2005 gibt es eine entfernungsabhängige Maut für LKW auf deutschen Autobahnen, die im Sommer 2018 auch auf Bundesstraßen ausgeweitet wurde. Seit Jahren wird auch die Einführung einer PKW-Maut diskutiert, die aber bislang nicht umgesetzt wurde. In diesem Szenario wird die Einführung einer solchen entfernungsabhängigen Maut für PKW untersucht.

In verschiedenen Szenarien werden unterschiedlich hohe Beträge je gefahrenen Kilometer auf Autobahnen und Bundesstraßen getestet. Dabei wird das Verlagerungspotential auf andere Verkehrsmittel untersucht. Insbesondere wird dabei die mögliche soziale Benachteiligung bestimmter Bevölkerungsgruppen analysiert. Weil das Modell agentenbasiert aufgebaut ist, lässt sich genau nachvollziehen, wer wie viel Maut bezahlt. So kann eine eventuelle Benachteiligung von Menschen mit niedrigerem Einkommen oder von Bewohnern in ländlichen Räumen quantifiziert werden.

Während im agentenbasierten Modell zwischen Autobahnen und Bundesstraßen unterschieden werden kann und somit auch basierend auf den Straßentyp Maut erhoben werden kann, ist diese Unterscheidung im aggregierten Modell nicht möglich. Im aggregierten Modell wird die Maut immer auf alle Bundesfernstraßen angewendet. Neben dem Basisszenario ohne Maut werden verschiedene Preise für die kilometerabhängige Straßenbenutzungsgebühr angenommen.

Die Vorschläge zur Einführung einer PKW-Maut auf deutschen Straßen sahen ein Modell mit Vignetten ähnlich zu denen der europäischen Nachbarn vor. Dies ist jedoch modelltechnisch nur

schwer umsetzbar, daher wird lediglich eine distanzabhängige Maut betrachtet. Die Schätzungen der Einnahmen durch die Maut des Bundesverkehrsministeriums beliefen sich auf 3,7 Mrd. € jährlich. Die Fahrleistung auf deutschen Autobahnen betrug im Schnitt in den vergangenen Jahren 252,6 Mrd. km. Daraus ergibt sich ein grober Schätzpreis von 0,015€/km, der im Modell auf alle Fahrzeuge angewandt werden kann. Betrachtet man ebenfalls die Straßenkategorie Bundesstraßen erhöht sich die Fahrleistung auf 361,9 Mrd. km und der Kilometerpreis reduziert sich somit auf 0,01€/km. Diese beiden Preisvarianten werden in Szenario 4 betrachtet. Hinzu kommt eine Variante mit einem Preis von 0,05€/km. Dieser Wert basiert auf Vergleichswerten von anderen europäischen Staaten wie Portugal und Italien.

Variante	Code	Preis [€/km]	Straßenkategorie
Maut auf Autobahnen	4_A_0	0	Autobahn
	4_A_1	0,015	Autobahn
	4_A_2	0,050	Autobahn
Maut auf Autobahnen und anderen Fernstraßen	4_B_1	0,015	Autobahn + Bundesstraße
	4_B_2	0,050	Autobahn + Bundesstraße

**Tabelle 3-24. Szenario 4 - Varianten**

### 3.4.5. Szenario 5: Deutschlandtakt, Koordinierung mit dem ÖPNV und zusätzliche nachfrageorientierte Mobilitätssysteme (Szenarien 1 + 2 + 3)

In diesem Kombinationsszenario werden zusätzlich zu einem an den Deutschlandtakt angepassten öffentlichen Verkehr die Zubringerfahrten zum schienenengebundenen Verkehr durch Ridepooling Zubringer verstärkt. Eine Abholung von der Haustür könnte in Bereichen mit sparsam oder nicht ausgebauten öffentlichen Verkehrssystemen die Attraktivität von intermodalen Wegeketten mit der Bahn als Hauptverkehrsmittel noch weiter erhöhen. Auch die Verbesserungen und Preisreduktionen im Fernbusnetz werden hier dargestellt und damit alle Maßnahmen zur Steigerung der Attraktivität des öffentlichen Verkehrs („pull“) kombiniert.

In diesem Szenario wird aus den zuvor vorgestellten und hier kombinierten Szenarien jeweils eine Variante ausgewählt. Dabei wird als Repräsentation des Deutschlandtaktes eine 10% Reisezeitreduktion über alle Strecken gewählt, für die Ridepooling Zubringer ein mittlerer Festpreis ohne kilometerabhängigen Preis gewählt und der Fernbusverkehr wird mit vergünstigten Preisen und erhöhter Geschwindigkeit modelliert.

### 3.4.6. Szenario 6: Maut und Optimierung des öffentlichen Verkehrs (Szenarien 1 + 2 + 3 + 4)

Schließlich werden in diesem Szenario die Maßnahmen aus den Szenarien 1, 2, 3 und 4 miteinander kombiniert. So sollen Synergieeffekte bewirkt werden. Während der PKW Verkehr teurer gemacht wird, wird im öffentlichen Verkehr eine erhebliche Verbesserung eingeführt. So kann der Nutzen von "Push" und "Pull" Maßnahmen sowie deren Kombination untersucht werden.

Auch hier wird jeweils eine Variante der entsprechenden Szenarien ausgewählt und miteinander kombiniert. Diese werden wie in Szenario 5 gewählt, hinzu kommt aus dem Szenario 4 die Variante in der eine kilometerabhängige Maut von 0,015 €/km auf allen Bundesfernstraßen erhoben wird.

### 3.4.7. Szenario 7: Bepreisung aller gefahrenen Fahrzeugkilometer

Im Verlaufe des Projektes wurde diskutiert, ein zusätzliches Szenario umzusetzen, welches eine konsequente Bepreisung aller mit dem PKW gefahrener Kilometer betrachtet, um die Reisenden vom Auto zu verdrängen. In diesem Szenario werden die Kosten für das Fahren mit dem motorisierten Individualverkehr teils drastisch erhöht, während die Preise aller anderen Verkehrsmittel konstant bleiben. Es werden verschiedene Preise von 20ct/km bis zu 2€/km untersucht, wie in [Tabelle 3-25](#) dargestellt.

Variante	Code	Preis [€/km]
Bepreisung des PKW	7_A_1	0,20
	7_B_1	0,50
	7_C_1	1,00
	7_D_1	2,00

**Tabelle 3-25: Szenario 7 - Varianten**

## 3.5. Indikatoren

Um die Auswirkungen auf die Lebensqualität des Menschen mit einzubeziehen, werden auch Indikatoren vorgeschlagen, die die Auswirkungen auf soziale Mobilität untersuchen. Konkret haben wir verkehrsbezogene Indikatoren; umweltbezogene Indikatoren und Indikatoren der sozialen Mobilität (Tabelle 3-26) untersucht.

Indikator	Indikatortyp	Verkehrsmittel	Modelle
Multimodale Erreichbarkeit	Sozial	Alle	Agentenbasiert
Modal Split	Verkehr	Alle	Agentenbasiert und aggregiert
Verkehrsstärken und Auslastungsgrad	Verkehr	PKW	Agentenbasiert
Tagesfahrleistung	Verkehr	PKW	Agentenbasiert und aggregiert
Verlustzeit	Verkehr	PKW	Agentenbasiert
CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>x</sub> , HC, PM Emissionen	Umwelt	PKW	Agentenbasiert
CO <sub>2</sub> -äquiv. Emissionen	Umwelt	PKW, Fernzug, Fernbus	Agentenbasiert und aggregiert
Schallemission	Umwelt	PKW	Agentenbasiert
Fahrtkosten/Einkommen Quote	Sozial	Alle	Agentenbasiert

**Tabelle 3-26. Zusammenfassung der berechneten Indikatoren**

In den nächsten Abschnitten wird die Berechnungsmethodik der Indikatoren beschrieben.

### 3.5.1. Agentenbasiertes Modell

Der erste Indikator ist die multimodale Erreichbarkeit. Dieser Indikator beschreibt das Verkehrsangebot in Bezug auf die Erreichbarkeit aller anderen Ziele von einem bestimmten Ort aus. Unter allen Erreichbarkeitsdefinitionen haben wir die verallgemeinerte Hansen-Erreichbarkeit (Gleichung [G15](#)) gewählt.

$$E_{i,m} = \sum_j B_j^\alpha e^{\beta t_{ijm}}$$

G15

wobei:

- $E_{i,m}$  ist die Erreichbarkeit der Zone I mit dem Verkehrsmittel m
- $B_j$  ist die Bevölkerung in Zone j
- $t_{ijm}$  ist die verallgemeinerte Reisezeit von Zone I nach Zone j mit dem Verkehrsmittel m in Stunden
- $\alpha$  und  $\beta$  sind Parameter des Modells

Die Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  wurden auf das Untersuchungsgebiet und die getesteten Maßnahmen kalibriert, da die Gewichte, die der Bevölkerung (Attraktor) und der verallgemeinerten Reisezeit (Impedanz) gegeben werden, ausgeglichen sein sollten. Für diese Anwendung wurde  $\alpha$  mit 0,5 und  $\beta$  mit -0,2 gleichgesetzt.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Die verallgemeinerte Reisezeit wird als Impedanz gewählt, um die Auswirkungen von Änderungen sowohl auf die Reisezeit als auch auf die Kosten zu berücksichtigen. Die verallgemeinerten Reisezeiten werden wie folgt berechnet (Gleichung G16):

$$t_{ijm} = t'_{ijm} + \frac{K_{ijm}}{VOT} \quad G16$$

Wobei:

- $t_{ijm}$  ist die verallgemeinerte Reisezeit von Zone I nach Zone j mit dem Verkehrsmittel m in Stunden
- $t'_{ijm}$  ist die Reisezeit von Zone I nach Zone j mit dem Verkehrsmittel m in Stunden
- $K_{ijm}$  sind die Kosten von Zone I nach Zone j mit dem Verkehrsmittel m in €
- VOT ist der Wert der Zeit („*Value of Time*“ auf Englisch) in €/Std. In unserem Fall war VOT gleich 32€/Std, was dem Wert der Zeit für Freizeit und andere Reisen entspricht, die den größten Teil der Fernreisen ausmachen. Der Einfachheit halber haben wir nur die VOT von 32 €/Std verwendet. Ein höherer Wert der Zeit, z. B. 65 €/Std für Geschäftsreisen, führt zu einer geringeren Preisempfindlichkeit.

Absolute Erreichbarkeiten sind für die Reisenden schwer zu interpretieren. Stattdessen beurteilen die Reisenden, wie gut ein Ort im Vergleich zu einem anderen Ausgangspunkt oder mit einem Verkehrsmittel im Vergleich zu einem anderen Verkehrsmittel erreichbar ist. Daher werden die Erreichbarkeiten in der Regel auf 100 skaliert. Nach der Berechnung aller Erreichbarkeiten mit Gleichung G15, haben wir die maximale Erreichbarkeit für jeden Verkehrsträger berechnet und die maximale Erreichbarkeit für alle Verkehrsträger und Zonen im Basisszenario ermittelt. Dann haben wir alle absoluten Erreichbarkeiten durch diesen Wert geteilt.

Die Erreichbarkeiten messen das Verkehrsangebot nach Verkehrsmittel, so dass sie nur die potenziellen Veränderungen bei der Nachfrage darstellen, sich aber nicht auf die Nachfrage selbst beziehen. Aus diesem Grund werden zusätzliche verkehrsbezogene Indikatoren berechnet.

Der erste und wichtigere Indikator, der die Verkehrsnachfrage beschreibt, ist der Modal Split. Der Modal Split stellt die Verteilung der Fahrten auf die einzelnen Verkehrsträger dar. Der Anteil eines bestimmten Verkehrsträgers ist definiert als der prozentuale Anteil der mit diesem Verkehrsträger zurückgelegten Wege an der Gesamtzahl der Wege.

Neben den Anteilen der einzelnen Verkehrsträger wurden auch Indikatoren für den Straßenverkehr berechnet. Diese sind wie folgt definiert:

- Anteil der Straßenlänge mit einem Auslastungsgrad über 0.5 in der Spitzenstunde, aufgeschlüsselt nach Straßentyp. Die Spitzenstunde ist definiert als die Stunde des Tages mit dem höchsten Verkehrsaufkommen, basierend auf den Modellergebnissen.
- Anteil der Straßenlänge mit einem Auslastungsgrad über 0.75 in der Spitzenstunde, nach Straßentyp. Die Spitzenstunde ist definiert als die Stunde des Tages mit dem höchsten Verkehrsaufkommen, basierend auf den Modellergebnissen.
- Fahrtleistung des Fernverkehrs, während des gesamten Tages. Sie wird berechnet als die Summe der zurückgelegten Entfernungen jedes Agenten, aufgeteilt nach Straßentyp. Die Eingabedaten für diese Berechnung sind die MATSim „Events“ Dateien.
- Durchschnitt Verlustzeiten im Verkehr durch Stauaufkommen, während des gesamten Tages. Die Berechnung basiert auf den Unterschied zwischen der tatsächlichen Reisezeit jeder Agent auf jedem Link und die Reisezeit bei maximaler Geschwindigkeit. Verlustzeiten werden danach nach Straßentyp gemittelt. Die Eingabedaten für diese Berechnung sind die MATSim „Events“ Dateien.

Diese vier Indikatoren beschreiben die Verkehrsbelastung unter verschiedenen Gesichtspunkten. Sie werden aus den Ergebnissen der Verkehrsumlegung (Verkehrsstärken und Reisezeiten) berechnet.

Nach der Berechnung der verkehrsbezogenen Indikatoren wurden die Reisekosten pro Haushalt auf der Grundlage der generalisierten Kosten und der Einkommensgruppe des Haushalts geschätzt. Die verallgemeinerten Reisekosten werden mit Gleichung G17 berechnet.

$$k_{ijm} = t'_{ijm} * VOT + K_{ijm} \quad G17$$

Wobei:

- $k_{ijm}$  sind die verallgemeinerten Reisekosten von Zone I nach Zone j mit dem Verkehrsmittel m in €
- Alle anderen Variablen sind bereits definiert.

Wir berechneten auch die Belastung der Verkehrskosten auf Haushalte nach Einkommensgruppen. Dieser Indikator dient als Maß für die soziale Gerechtigkeit, da er die Ausgaben für den Verkehr mit

dem Haushaltseinkommen vergleicht. Das durchschnittliche Verhältnis zwischen Fahrtkosten und Einkommen wurde für jede wirtschaftliche Statusgruppe des Haushalts berechnet.

Die Emissionen des Straßenverkehrs wurden mit der MATSim-Erweiterung "emissions" (Hülsmann et al., 2011) berechnet. Diese Erweiterung verwendet als Eingabe die Ereignisdatei aus der MATSim-Simulation und berechnet die freigesetzten Mengen an CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC und PM. Die für die Emissionsberechnungen verwendeten Emissionsfaktoren stammen aus dem Handbook of Emission Factors for Road Transport (HBEFA, 2017). Die HBEFA-Emissionsfaktoren werden nach Fahrzeugtypen (PKW und LKW) und Straßenverkehrsbedingungen differenziert. Das Ergebnis der Erweiterung ist die Gesamtmenge der betrachteten Emissionen, die von jedem Fahrzeugtyp auf jeder Verbindung des Netzes freigesetzt wird. In einem Postprozess haben wir die Emissionen auf den Strecken in drei Kategorien aggregiert: Autobahn, Bundesstraßen und sonstige, wobei zwischen verschiedenen Fahrzeugtypen unterschieden wurde. Die Ergebnisse wurden mit 100 multipliziert, um die Gesamtzahl zu ermitteln.

Zusätzlich haben wir die CO<sub>2</sub>-äquivalent-Emissionen nach Verkehrsmittel berechnet, um zu beurteilen, ob die Verkehrsverlagerung die Gesamtemissionen verringert hat. Dazu multiplizierten wir die je Verkehrsmittel zurückgelegte Strecke mit dem entsprechenden Emissionsfaktor. Die Emissionsfaktoren der wichtigsten Verkehrsmittel wurden vom deutschen Umweltministerium (Umwelt Bundesamt, 2021) bezogen.

Verkehrsmittel	Emissionsfaktor, g/Pkm
PKW	154
Flugzeug	214
Fernzug	29
Fernbus	29
Zug, Nahverkehr	54
Bus, Nahverkehr	83
Straßen-, Stadt- und U-Bahn	54

**Tabelle 3-27. Emissionsfaktoren nach Verkehrsmittel (Umwelt Bundesamt, 2021) (Umwelt Bundesamt, 2021)**

Die Emissionen für Zu- und Abgangsfahrten wurden ebenfalls berücksichtigt. Der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) ist ein Zu- und Abgangsverkehrsmittel zum Erreichen und Verlassen von Fernverkehrsbahnhöfen und Busbahnhöfen. Der Emissionsfaktor für den öffentlichen Personennahverkehr wurde auf der Grundlage seines Anteils am Verkehrsaufkommen auf 59,1 g/Pkm gemittelt (Tabelle 3-27, Tabelle 3-27, Tabelle 3-27, MID). Die Reisezeitmatrizen (Skims) von Fernbus und Bahn geben die gesamte Strecke einer Reise vom Start- zum Zielort an. Da die

**Formatiert:** Schriftart: (Standard) +Textkörper (Arial), Rechtschreibung und Grammatik nicht prüfen

**Formatiert:** Deutsch (Deutschland)

Emissionsfaktoren für den öffentlichen Personennahverkehr und den Fernverkehr unterschiedlich sind (Tabelle 3-27), haben wir den Anteil des Fernverkehrs anhand der gesamten Reiselänge geschätzt. Der Schwellenwert wurde für Fernbus und Bahn auf 500 km festgelegt. Die Anteile von Fernbus und Bahn an der gesamten Reiselänge ist im Basisszenario messbar, nicht aber in den Szenarien 2, 3, 5 und 6, in denen die verbesserten Dienste nicht explizit modelliert werden. Aus Gründen der Konsistenz verwenden wir  $G_{18}$  bzw.,  $G_{19}$  in allen Szenarien. Anschließend wurde dieser Anteil mit der gesamten Reiselänge multipliziert, um die Entfernung des Fernverkehrsmittels allein zu ermitteln.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

$$A_z = \begin{cases} 0.67 + 0.00067 \cdot E & \text{falls } E < 500 \text{ km} \\ 0.93 & \text{falls } E \geq 500 \text{ km} \end{cases} \quad G_{18}$$

$$A_B = \begin{cases} -0.053 + 0.0019 \cdot E & \text{falls } E < 500 \text{ km} \\ 0.99 - 0.00052 \cdot E & \text{falls } E \geq 500 \text{ km} \end{cases} \quad G_{19}$$

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Wobei:

- $A_z$  ist der Anteil der Reise, der mit dem Fernzug zurückgelegt wird (km)
- $E$  ist die Gesamtentfernung in km
- $A_B$  ist der Anteil der Reise, der mit dem Fernbus zurückgelegt wird (km)

Die Schätzung des Verkehrslärms basiert auf dem MATSim-Beitrag "noise" (KADDOURA et al., 2016a; KADDOURA et al., 2016b). Diese Erweiterung verwendet eine Ereignisdatei aus der MATSim-Verkehrszuweisung und eine Straßennetzdatei als Eingabe. Die Ausgabedatei enthält die Informationen über die Schallemissionspegel auf jeder Verbindung des Netzes für jede Stunde des Tages. Wir haben die Daten weiterverarbeitet, um die Verbindungstypen für die weitere Analyse zuzuordnen. Ein durchschnittlicher Schallemissionspegel zu einer bestimmten Stunde des Tages wurde auf der Grundlage des gemeldeten Schallemissionspegels auf jeder Verbindung des Netzes und gewichtet nach der Entfernung der Verbindungen geschätzt (Gleichung  $G_{20}$ ).

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

$$L_p = \frac{\sum_{i=1}^n L_{pi} * l_i}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad G_{20}$$

wobei:

- $L_p$  der Schallemissionspegel in dB(A) ist
- $L_{pi}$  der Schallemissionspegel von Kante  $i$  in dB(A) ist und

- $l_i$  die Länge von Kante  $i$  in km ist

Bei der Verarbeitung der Verkehrsschallverteilung über einen Zeitraum von 24 Stunden wurde festgestellt, dass die Spitzenstunde des Schall zwischen 15:00 und 19:00 Uhr liegt (Bild 4-4). Daher berechneten wir den durchschnittlichen Schallemissionspegel zwischen 15:00 und 19:00 Uhr. Außerdem berechneten wir den Prozentsatz der Straßenlänge, auf der der Lärm 80 db (A) überstieg. Dieser Schwellenwert wurde gewählt, um den Schallemissionspegel in einem verkehrsreichen städtischen Gebiet darzustellen (Center for Environmental Excellence, 2020), der dem erwarteten Schallemissionspegel einer Autobahn in der Spitzenstunde entspricht. Diese Berechnung der stündlichen Werten basiert auf dem Standard nach RLS-19. Die zwischen 15:00 und 19:00 durchschnittliche Werten und den Prozentsatz der Straßenlänge über 80 dB (A) entsprechen nicht dem Standard und werden ausschließlich für den Vergleich zwischen Szenarien definiert.

Der letzte Indikator ist das Verhältnis zwischen den verallgemeinerten Reisekosten für Fernreisen und dem Haushaltseinkommen. Dieser Indikator spiegelt die Belastung der Haushalte durch die allgemeinen Reisekosten wider und kann einen Hinweis darauf geben, wie ungleich die Reisekosten für verschiedene Gruppen von Nutzern sind. Die allgemeinen Reisekosten werden den Reisekosten vorgezogen, um die Abwägung zwischen schnelleren, aber teureren Optionen zu berücksichtigen. Wir haben uns entschieden, diesen Indikator nach dem sozioökonomischen Status und nicht nach dem reinen Einkommen zu kategorisieren. Der sozioökonomische Status ist eine in der MiD definierte Variable, die das Verhältnis zwischen Haushaltseinkommen, Anzahl der Erwachsenen und Anzahl der Kinder berücksichtigt. MiD kategorisiert den sozioökonomischen Status in 5 Kategorien, die von sehr niedrig bis sehr hoch reichen. Um diese Variable zu erhalten, haben wir zunächst das Verhältnis zwischen Kosten und Haushaltseinkommen für alle Agenten berechnet und den Durchschnittswert nach sozioökonomischem Status ermittelt. Wenn die Maßnahme den Unterschied zwischen niedrigem und hohem sozioökonomischen Status vergrößert, würde dies zu einer ungleichen Verteilung der Ressourcen führen.

### 3.5.2. Aggregiertes Modell

Da das aggregierte Modell nur Verkehrsflüsse und keine einzelnen Personen betrachtet, können in diesem Modell auch nur aggregierte Informationen ausgewertet werden. Die Analysen des Modells beziehen sich insbesondere auf den Modal Split und verkehrliche Indikatoren wie die gefahrenen Fahrzeugkilometer.

Feldfunktion geändert

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Da im aggregierten Modell keine soziodemographischen Daten berücksichtigt werden, können die sozialen Indikatoren multimodale Erreichbarkeit sowie das Verhältnis der Fahrkosten zum Einkommen nicht berechnet werden. Der Modal Split wird auch im aggregierten Modell berechnet. Im Gegensatz dazu können die Verkehrsstärken und Auslastungsgrade, die sich auf einzelne Abschnitte des Straßennetzes beziehen, nicht berechnet werden, da das aggregierte Modell immer das ganze Netzwerk betrachtet. Die Tagesfahrleistung wird wie folgt berechnet:

$$vkt = vkt_s + vkt_B + vkt_F \quad \text{G21}$$

mit:

- $vkt$ , der Tagesfahrleistung
- $vkt_s$ , der Tagesfahrleistung für Fahrten, die mit dem PKW zurückgelegt werden
- $vkt_{B/F}$ , die Tagesfahrleistung für Fahrten, die mit der Bahn oder dem Fernbus zurückgelegt werden.

Die Tagesfahrleistung der PKW-Fahrten ergibt sich nach folgender Formel:

$$vkt_s = \sum_t \sum_{O^V} \sum_{D^V} M(O_S \rightarrow D_S, t) \cdot \overline{d[O_S \rightarrow D_S]} \quad \text{G22}$$

mit

- $\overline{d[O_S \rightarrow D_S]}$ , der durchschnittlichen Distanz zwischen Quelle und Ziel.

Die Tagesfahrleistung von Bahn- und Busfahrten errechnet sich nach der folgenden Formel:

$$vkt_{B\&F} = \sum_t \sum_{O^V} \sum_{D^V} M\left(\frac{O_B}{F} \rightarrow \frac{D_B}{F}, t\right) \cdot (d[O_V \rightarrow O_B] + d[D_{B/F} \rightarrow D_V]) \cdot 62\% \quad \text{G23}$$

Um Verlustzeiten zu berechnen, muss ein Modell Reisezeiten für den freien sowie den gestauten Verkehr kennen. Im aggregierten Modell kann dieser Indikator nicht berechnet werden, da nicht für jede Fahrt der korrekte Verkehrszustand reflektiert werden kann.

Auch die umweltbezogenen Indikatoren können nur teilweise aus dem aggregierten Modell heraus berechnet werden. Die CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC, PM Emissionen könnten zwar in SUMO ermittelt werden, dazu bedarf es aber Informationen zu den Fahrzeugklassen, welche in diesem Modell nicht berücksichtigt werden. Daher werden diese Kenngrößen nicht berechnet. Die CO<sub>2</sub>-äquivalente sind hingegen aggregiert und können auch im aggregierten Modell, analog zum agentenbasierten Modell mit denselben Koeffizienten, berechnet werden. Der Indikator Lärm beruht wiederum auf Straßenabschnitte und kann daher im aggregierten Modell nicht bewertet werden.

## 4. Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Modells beschrieben. Der Abschnitt ist in Szenarien gegliedert. Innerhalb jedes Szenarios werden die Ergebnisse der beiden verschiedenen Modelle beschrieben.

### 6.0. Basisszenario

Das Basisszenario stellt eine Situation dar, in der die Bevölkerung bis zum Jahr 2030 prognostiziert wird, aber keine Änderungen im Verkehrsangebot oder Reiseverhalten vorgenommen werden. Dieses Szenario wird bei der Beschreibung der Ergebnisse der Szenarien 1 bis 6 als Referenzszenario verwendet.

#### 8.0.0. Agentenbasiertes Modell

Im Basisszenario ist zu beobachten, dass die Erreichbarkeit je nach Verkehrsmittel sehr unterschiedlich ist (Tabelle 4-1). Die Ergebnisse werden nach Gemeindetyp unterschieden. Dazu haben wir den Durchschnittswert der Zonen berechnet, die einem bestimmten Gemeindetyp zugeordnet sind. Ebenso wurde die maximale Erreichbarkeit für alle Zonen eines bestimmten Gemeindetyps ermittelt. Der PKW ist das Verkehrsmittel mit der höchsten durchschnittlichen Erreichbarkeit, mit Werten zwischen 77,4 und 80,0%. Der Fernbus ist das Verkehrsmittel mit der geringsten Erreichbarkeit, und der Durchschnittswert beträgt etwa ein Fünftel des Autoverkehrs (15,7 im Vergleich zu 80,0% in den Kernstädten). Die Unterschiede bei der durchschnittlichen Erreichbarkeit sind in ländlichen Gemeinden größer, wo die Erreichbarkeit mit dem Bus zehnmal geringer ist als die Erreichbarkeit mit dem PKW (6,8 gegenüber 77,4%). Beim Vergleich der maximalen Erreichbarkeit ist festzustellen, dass mit der Bahn die Zielzonen ein Drittel weniger erreichbar sind als mit dem PKW, und mit dem Fernbus zwei Drittel weniger erreichbar als mit dem PKW.

Indikatoren	Gemeindetyp	PKW	Fernzug	Fernbus
Fernzug durchschnittliche Erreichbarkeit (%)	Kern- und Großstädte	80,0	52,8	15,7
	Mittelstädte	81,7	46,4	10,9
	Kleinstädte	79,6	40,2	8,1
	Ländliche Gemeinden	77,4	37,1	6,8
Fernzug Maximale Erreichbarkeit (%)	Kern- und Großstädte	99,8	72,4	36,3
	Mittelstädte	99,2	66,9	23,8
	Kleinstädte	99,9	64,8	22,1
	Ländliche Gemeinden	100,0	65,6	21,5

Tabelle 4-1. Basisszenario – Erreichbarkeit

Die Durchschnitts- und Maximalwerte nach Gemeindetyp deuten darauf hin, dass innerhalb der einzelnen Raumtypen größere Unterschiede in der Verteilung auftreten können. Bild 4-1 zeigt die kumulative Verteilung der Erreichbarkeit nach Gemeindetyp und Modus. Wie zu beobachten ist, sind die Verteilungen in Kernstädten steiler und werden glatter, wenn der Gemeindetyp weniger dicht ist. Dies deutet darauf hin, dass es in Kernstädten weniger Unterschiede in der Erreichbarkeit gibt, während wir in ländlichen Gemeinden eine größere Bandbreite an Erreichbarkeiten beobachten können. Ein weiteres interessantes Ergebnis ist, dass die Erreichbarkeit mit der Bahn in den Kernstädten näher an der Erreichbarkeit mit dem PKW liegt, was darauf hindeutet, dass das höhere Angebot an Bahndienstleistungen in den Kernstädten den Abstand zwischen PKW und Bahn verringert. Der Abstand wird größer, je ländlicher die Gemeinde ist.

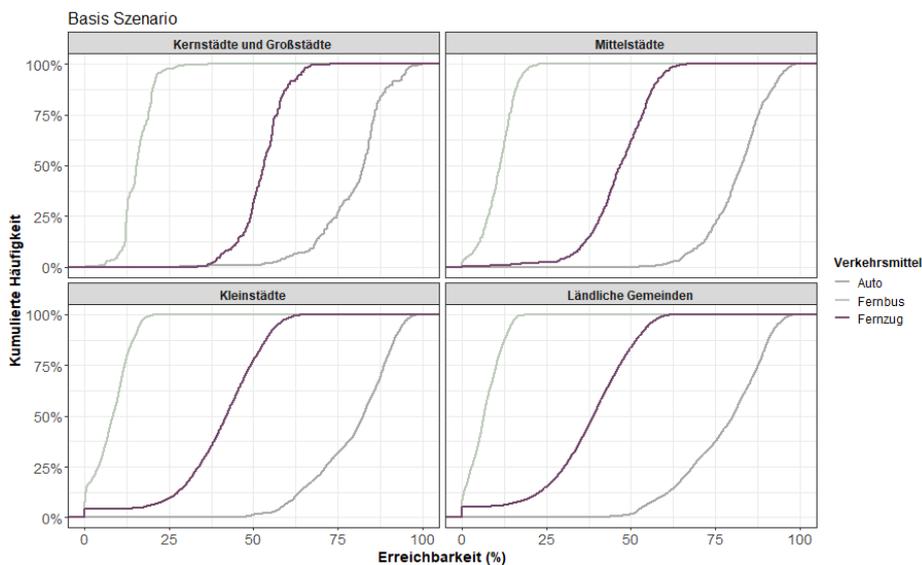


Bild 4-1. Basisszenario – Erreichbarkeit

Die unterschiedlichen Werte für die Erreichbarkeit zeigen, dass das Verkehrsangebot je nach Verkehrsträger und Gemeindetyp variiert. Daraus ergeben sich die Anteile der Verkehrsträger, wobei das PKW im Basisszenario der vorherrschende Verkehrsträger ist (Tabelle 4-2). Der Anteil des PKW liegt bei 77,6 %, gefolgt von der Bahn (12,1%), dem Flugzeug (6,8%) und dem Fernbus (3,6%). Betrachtet man nur die Inlandsreisen, die mit dem Landverkehr durchgeführt werden, so steigt der Anteil des PKWs und der Bahn auf 83,6 bzw. 13,1%. Der Fernbus wird von etwas weniger Nutzern gewählt, etwa 3,3 %.

Ziel Typ	Verkehrsmittel	Modal Split
Inland und Ausland	PKW	77,60%
	Fernzug	12,07%
	Fernbus	3,56%
	Flugzeug	6,77%
Inland	PKW	83,61%
	Fernzug	13,05%
	Fernbus	3,34%

Tabelle 4-2. Basisszenario—Modal Split

Als Ergebnis des Modal Splits wurde die Verkehrsumlegung zusammen mit dem Nahverkehr und dem Güterverkehr durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 4-2 dargestellt. Die Karte zeigt die Straßen mit mehr als 20.000 Fahrzeugen pro Tag und Richtung in Rot.

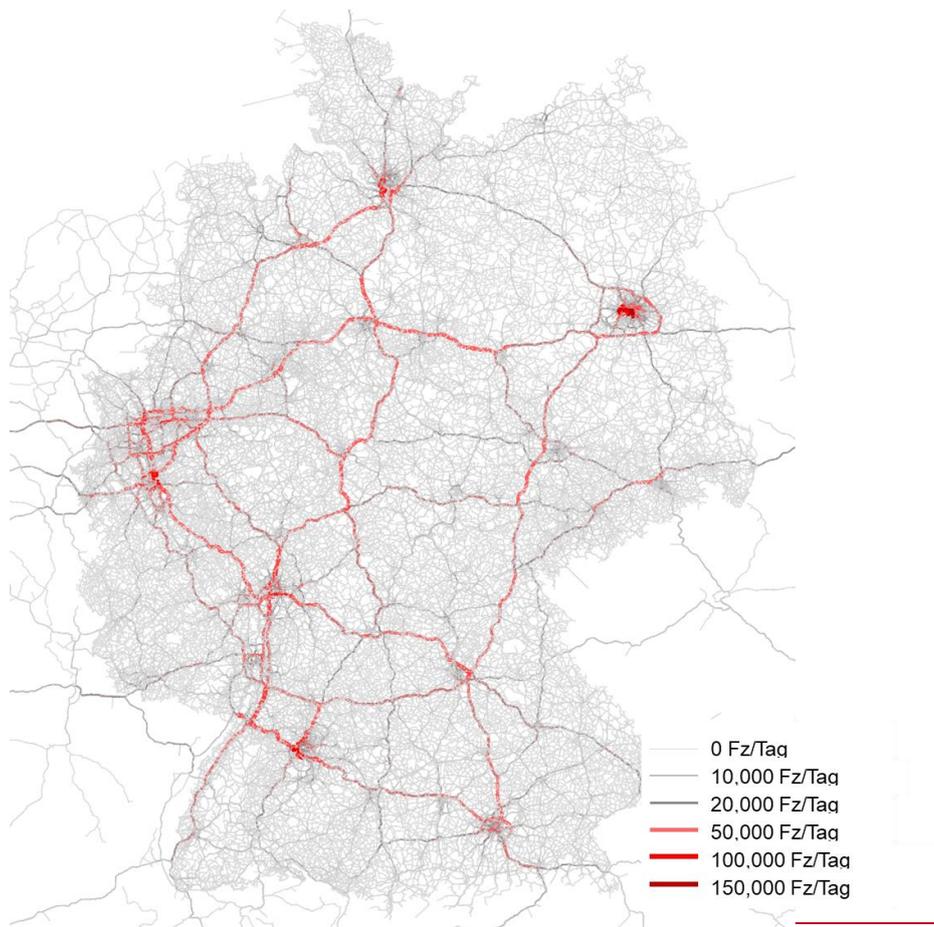


Bild 4-2. Verkehrsstärken in 2030 (Basisszenario) (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)

Durch Nachbearbeitung dieser Verkehrsstärken werden die weiteren verkehrsbezogenen Indikatoren berechnet, so entfällt auf die Autobahnen der größte Anteil der zurückgelegten Strecke. Auf sie entfallen 370,2 Mio. Fahrzeugkilometer pro Tag, das sind etwa 60% der Gesamtverkehrsstärken (Nebenstraßen sind nicht in das Modellnetz einbezogen und werden daher bei diesen Berechnungen nicht berücksichtigt). Auch die Verlustzeiten sind auf den Autobahnen höher, was auf die höheren Verkehrsstärken, aber auch auf die Tatsache zurückzuführen ist, dass

viele längere Fahrten auf Autobahnen durchgeführt werden, während die übrigen Straßen nur am Anfang oder am Ende der Fahrt genutzt werden.

Tabelle 4-3 zeigt die Verkehrsbezogene Indikatoren des Basisszenarios. Die ersten beiden Indikatoren spiegeln den Grad der Überlastung in der Spitzenstunde wider. Es wurde festgestellt, dass auf mehr als 20% der Autobahnlänge die Verkehrsstärken über 50% der Kapazität auf die Spitzenstunde liegt. Dieser Wert sinkt auf 3,8%, wenn die Verkehrsstärken 75% der Kapazität überschreitet. Die Autobahnen sind, mit einigen Unterschieden, die am stärksten überlasteten Teile des Netzes.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Verkehrsbezogene Indikatoren	Straßentyp	Wert
Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.5 V/C Auslastung (%)	Autobahnen	20,3
	Bundesstraßen	3,1
	Sonstige	1,1
Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.75 V/C Auslastung (%)	Autobahnen	3,8
	Bundesstraßen	0,3
	Sonstige	0,4
Fahrtleistung des Fernverkehrs (Mio. km/Tag)	Autobahnen	370,2
	Bundesstraßen	64,9
	Sonstige	184,8
Durchschnitt Verlustzeiten im Verkehr durch Stauaufkommen (min)	Autobahnen	8,7
	Bundesstraßen	2,3
	Sonstige	8,2

Tabelle 4-3. Verkehrsbezogene Indikatoren des Basisszenarios

Die Bild 4-3 zeigt die CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC und PM-Emissionen auf verschiedenen Straßentypen, die von PKW Fernverkehr, PKW Nahverkehr und LKW während des simulierten Tages freigesetzt werden. Der Wert auf jedem Balken zeigt den Anteil der Emissionen, die von den einzelnen Verkehrsträgern auf einer ausgewählten Straßenart und Emissionsart erzeugt werden. Auf Autobahnen verursachen LKW im Vergleich zu den anderen Verkehrsträgern die meisten Emissionen, gefolgt von PKW Fernverkehr. Der Hauptverursacher von Emissionen auf Bundesstraßen ist PKW Nahverkehr für jeden der dargestellten Schadstoffe, gefolgt von PKW Fernverkehr. LKW tragen am wenigsten zu den Emissionen auf Bundesstraßen und sonstigen Straßen bei.

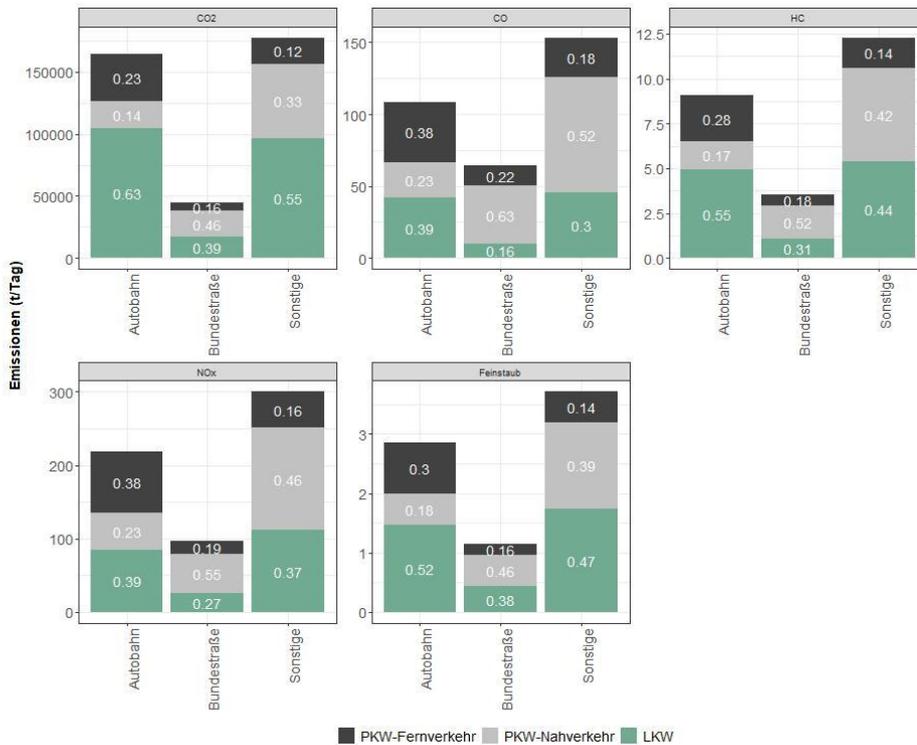


Bild 4-3.-Emissionen nach Schadstoff, Segment und Straßentyp

Das Verkehrsmittel mit den meisten Treibhausgas-Emissionen ist der PKW aufgrund seines hohen Modal-Split-Anteils. (Tabelle 4-4). Interessanterweise verursacht der Luftverkehr 22% aller Emissionen, obwohl nur 6,7% der Fahrten mit dem Flugzeug zurückgelegt werden. Die Fernbahn und der Fernbus, auf die 15,6% der gesamten Fahrten entfallen, trägt nur zu 2,6% der Emissionen bei.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Verkehrsmittel, CO <sub>2</sub> -äquivalent (t)	PKW			Fernbus	Fernzug	Gesamt, CO <sub>2</sub> -äquivalent (t)
Flugzeug	172.396,10	1.288,55	4.726,18	4.726,18	51.477,91	229.888,73

Tabelle 4-4. Basisszenario – CO<sub>2</sub>äq Emissionen (t)

Bild 4-4 zeigt die tägliche Schallverteilung auf Autobahnen, Bundesstraßen und sonstigen Straßen. Die gemittelten Schallemissionspegel auf Autobahnen überschreiten für jede Stunde des simulierten Tages den Grenzwert von 80 dB(A) von 9:00 bis 21 Uhr. An Bundesstraßen und den

anderen Netztypen liegen die gemittelten Schallemissionspegel innerhalb der festgelegten Schwellenwerte, immer unter 80 dB(A). In der Bild 4-4 ist der Zeitraum der Spitzen von 15:00 bis 19:00 Uhr zu sehen. Dieser Zeitraum wird für den Vergleich der Szenarien weiterverwendet.

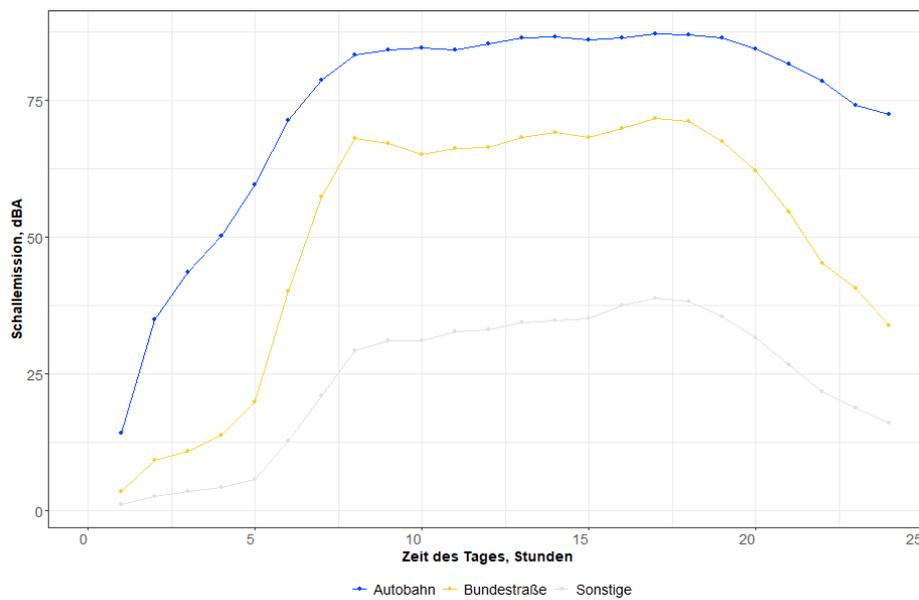


Bild 4-4. Stündliche Schallemission (Basisszenario)

Bild 4-5 zeigt die gemittelten Schallemissionspegel im Zeitraum von 15:00 bis 19:00 Uhr auf allen drei Straßentypen. Auf der Autobahn liegt der durchschnittliche Schallemissionspegel bei 86,6 dB(A), auf den Bundesstraßen bei 69,7 dB(A) und auf den anderen Straßentypen bei 37,1 dB(A).

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

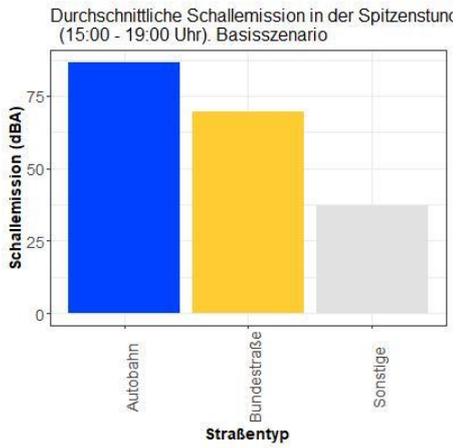


Bild 4-5. Durchschnittliche Schallemissionspegel in der Spitzenstunde (15:00 – 19:00)

~~Bild 4-6 zeigt, dass über 80% der gesamten Autobahnstrecke in der Spitzenstunde Schallemissionspegel von über 80 dB(A) aufweisen. Ähnlich verhält es sich bei der Bundesstraße, wo 60% der gesamten Netzlänge Schallemissionspegel über dem Grenzwert aufweisen.~~

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

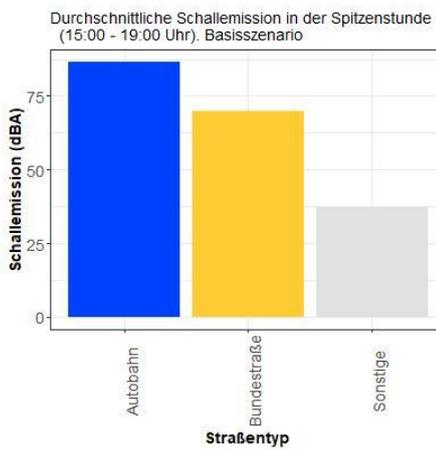


Bild 4-6. Durchschnittlicher Schallemissionspegel in der Spitzenstunde von 15:00 bis 19:00 Uhr

Der letzte Indikator ist die Belastung von Bepreisung auf Haushalte nach Einkommensgruppen. Es überrascht nicht, dass das Verhältnis mit zunehmendem sozioökonomischem Status des Haushalts sinkt. Bei Haushalten mit sehr niedrigem sozioökonomischem Status beträgt der prozentuale Anteil der allgemeinen Reisekosten am Einkommen 26,6%, während er bei Haushalten mit sehr hohem sozioökonomischem Status bei 4,8% liegt. Die relativen Unterschiede zwischen dem sozioökonomischen Status sind zwischen Haushalten mit sehr hohem und niedrigem sozioökonomischem Status linear, mit Unterschieden zwischen 3,4 und 4,6 Prozentpunkten. Der Unterschied zwischen Haushalten mit sehr niedrigem und niedrigem sozioökonomischem Status beträgt jedoch fast 10 Prozentpunkte, was darauf hindeutet, dass Haushalte mit sehr niedrigem sozioökonomischem Status eine viel größere Belastung haben als andere.

Ökonomischer Status des Haushalts	Wert
sehr hoch	4,84
hoch	9,00
mittel	12,38
niedrig	16,93
sehr niedrig	26,61

Tabelle 4-5. Basisszenario – Belastung von Haushalten durch Bepreisung nach Einkommensgruppen

## 192.0.0. Aggregiertes Modell

Auch im aggregierten Modell wird zunächst ein Basisszenario entwickelt. Dieses Szenario wird dazu verwendet das Modell zu kalibrieren. Im Anschluss ist es möglich, die kalibrierten Modellparameter auf die Szenarien anzuwenden und so die Veränderungen in der Modalwahl unter den Bedingungen in den einzelnen Szenarien zu identifizieren. Im Kalibrierungsprozess werden die Modellparameter des Verkehrsmittelwahlmodells so lange angepasst, bis sich die korrekten Werte in der Verkehrsmittelwahl ergeben. Diese Werte wurden aus den Ergebnissen des agentenbasierten Modells identifiziert und sind in Tabelle 4-6.

Fahrtzweck	PKW	Bus	Bahn
Alle	85.34%	2.93%	11.73%
Arbeit	86.96%	1.44%	11.59%
Freizeit	81.80%	5.87%	12.32%
Privat	86.43%	2.16%	11.41%

Tabelle 4-6. Modal-Split

Die Werte entsprechen nicht exakt denen des agentenbasierten Modells, da im aggregierten Modell keine Fahrten berücksichtigt werden, die ihre Quelle oder ihr Ziel außerhalb von Deutschland haben.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Zusätzlich zum Modal Split wurden auch im aggregierten Modell Fahrleistungen und Emissionen ermittelt (Tabelle 4-7). Die Fahrleistung wird getrennt für die einzelnen Modi ermittelt. Sofern für die Fernreise die Bahn oder der Bus gewählt wird, besteht immer noch die Möglichkeit, dass der PKW für die Zu- oder Abfahrt zum/vom (Bus-)Bahnhof genutzt wird. Die entsprechende Fahrleistung wird in der Berechnung der Gesamtfahrleistung mit dem PKW berücksichtigt. Die Faktoren zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-äquivalente verwendet werden, analog zum agentenbasierten Modelle. Im ÖPNV gibt es Faktoren für die verschiedenen Modi. Da diese einzelnen Modi im aggregierten Modell nicht berücksichtigt werden, wird basierend auf dem Modal Split aus MiD ein durchschnittlicher Faktor ermittelt und für die ÖV Zu- und Abfahrten angewandt.

Szenario	Indikatoren			
	Fahrleistung – PKW	Fahrleistung – g-Fernzug	Fahrleistung – Fernbus	CO <sub>2</sub> -äquivalente
Basisszenario	675,69 Mio. km	118,25 Mio. km	30,36 Mio. km	111,10 Tsd. t

Tabelle 4-7. Werte der Indikatoren im Basisszenario des aggregierten Modells

## 238.0. Szenario 1

### 239.0.0. Agentenbasiertes Modell

#### Eingabedaten

Um die Einführung von Ridepooling für den Zugang zu Fernverkehrszügen darzustellen, haben wir eine neue Reihe von Skim-Matrizen (Fahrzeit, Entfernung, Zugangszeit usw.) erstellt, wobei wir davon ausgingen, dass der Zu- und Abgang zu/von Fern- oder Regionalzügen immer über das Straßennetz erfolgt.

In Bild 4-7 ist der Berechnungsprozess zusammengefasst. Bei der Erreichbarkeit zu Fuß und mit dem öffentlichen Nahverkehr werden die Haltestellen in einem Radius von 1 km berücksichtigt. Die Gehzeit zu jeder dieser Haltestellen wird auf der Grundlage von Luftlinienentfernungen und einer durchschnittlichen Gehgeschwindigkeit von 3 km/h berechnet. Diese Zugangszeit wird zur Gesamtzeit addiert, um die beste Alternative auszuwählen, die möglicherweise an einer Haltestelle beginnt, die nicht die nächstgelegene ist. Bei der Nutzung des PKW Ridepooling als Zugangsmittel wird derselbe Prozess wiederholt. Allerdings wird der Suchradius auf bis zu 40 km erweitert, und die Berechnung der Fahrzeiten mit dem Ridepooling PKW erfolgt auf der Grundlage des PKW-Netzes unter nicht belasteten Bedingungen. Anstelle der Geschwindigkeit im freien Verkehr wird jedoch eine Geschwindigkeit von 40 km/h gewählt, um ein gewisses Maß an Staus, Haltestellen

und Wartezeiten bei gemeinsam genutzten Diensten anzunehmen (die tatsächlichen Staumuster sind vor Durchführung der Simulationen nicht bekannt).

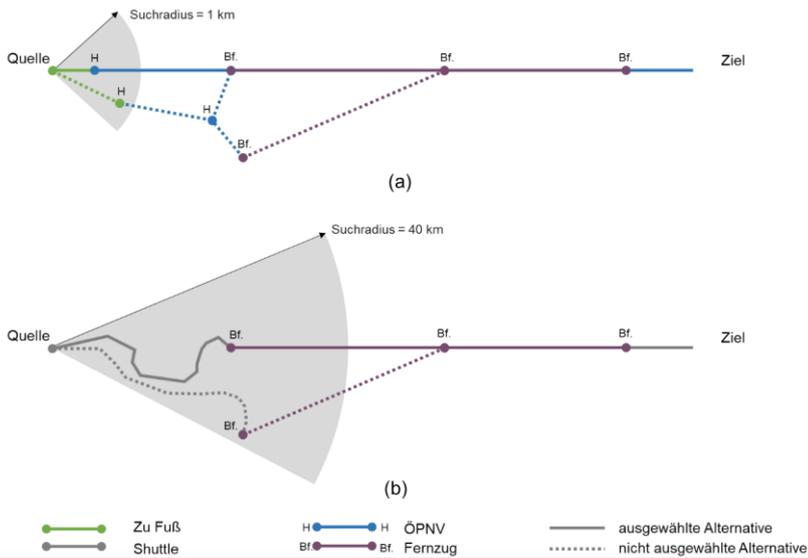


Bild 4-7. Berechnung der Fahrtzeiten mit Fußweg und ÖV (oben) und mit Ridepooling (unten) als Zugangsmodus (die Ausstiegsfahrt wird zu Visualisierungszwecken ignoriert).

Es ist festzustellen, dass dieser Zugangsentfernung Anstieg (gemessen am Durchschnitt jedes Start-Ziel-Paars) relativ gesehen bei Verbindungen, die entweder in ländlichen Gemeinden beginnen oder enden (oder beides), wo der öffentliche Nahverkehr weniger häufig verkehrt, größer ist. Dies hat den Preis, dass sich die Gesamtentfernung erhöht. Dieser Anstieg ist darauf zurückzuführen, dass die Zu- und Abgangswege mit dem PKW Ridepooling viel länger sind als zu Fuß. Obwohl sich die Entfernung vergrößert, verkürzt sich die Reisezeit durch die direkte Verbindung mit dem PKW.

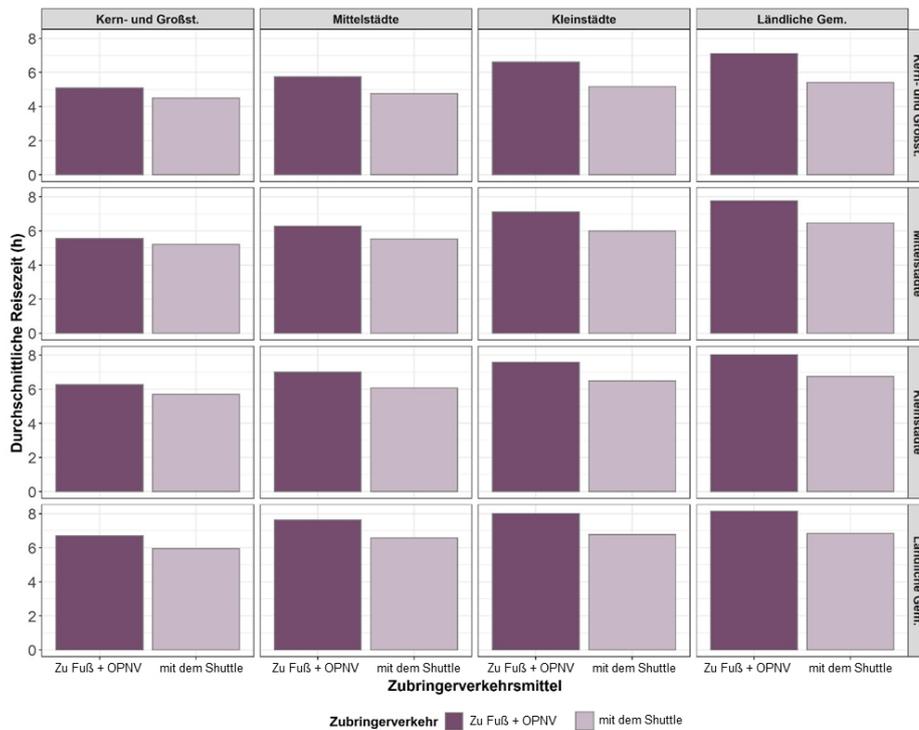


Bild 4-8 Zubringerverkehrsmittel PKW Ridepooling (dunkel) und zu Fuß + ÖPNV (hell) nach Typ der Startzone (Zeilen) und Typ der Zielzone (Spalten) Integration in das Verkehrsmittelwahlmodell

Um ein realistischeres Szenario zu schaffen, haben wir den Zugang zum Ridepooling additiv zur aktuellen Situation hinzugefügt. Das bedeutet, dass die Reisenden zwischen dem Zugang zu Fuß und dem öffentlichen Nahverkehr und dem Zugang zum Ridepooling wählen können. Zu diesem Zweck fügten wir das Ridepooling als eine der beiden Unteroptionen zu unserem aktuellen Verkehrsmittelwahlmodell hinzu und bildeten ein neues verschachteltes Verkehrsmittelwahlmodell (Bild 4-9). Der Vorteil der verschachtelten Struktur besteht darin, dass die Reisenden zwischen zwei Zugangsoptionen wählen können, anstatt die Option des Zugangs zu Fuß und mit dem ÖPNV durch ein erweitertes Ridepooling Zugang zu ersetzen, was bei der Implementierung eines multinomialen Logit-Modells der Fall wäre. Die Kosten für Ridepooling wurden in die Kostenberechnung einbezogen

Die Koeffizienten für die Nutzenberechnung für die Fernbahn mit Ridepoolinganschluss bleiben die gleichen wie für den Fußweg und den Transitanschluss. Der Verschachtelungskoeffizient für das Schienennest wird erfahrungsgemäß auf 0,25 gesetzt. Darüber hinaus wurde das Modell so kalibriert, dass es dem Status quo entspricht. Dabei gehen wir davon aus, dass der Gesamtanteil der Bahn dem Basisszenario entspricht, wenn die Kosten für die Nutzung des Ridepoolings teuer oder gleich hoch wie die des Taxis sind. Nach der Kalibrierung haben wir nur einen geringfügigen und vernachlässigbaren Anstieg des Bahnanteils festgestellt, wenn die Kosten für die Nutzung des Ridepoolings gleich hoch sind wie die Kosten für das Taxi.

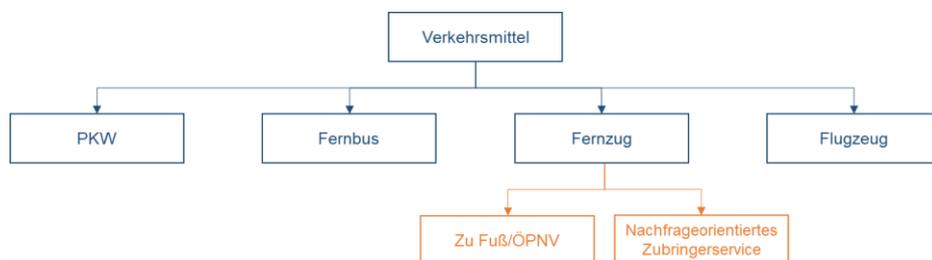


Bild 4-9. Struktur des Verkehrsmittelwahlmodells mit Zugang zu Fuß/ÖPNV und nachfrageorientiertem Zubringerservice

### Sensitivitätsanalyse

Wir führen Szenarien mit verschiedenen Preisoptionen für das Ridepooling durch, wie in Abschnitt 3.4.2 erörtert. Der Anteil des Fernverkehrs steigt in allen Szenarien. Wie erwartet ist die Veränderung des Modalanteils abhängig von der Kostenstruktur: je höher die Gesamtkosten, desto geringer die Differenz zum Basisszenario. Niedrige Festpreise (1\_A\_1) oder niedrige Kosten pro km (1\_B\_1) führten zu einem Anstieg des Bahnanteils um 3,01 bzw. 2,71% im Vergleich zum Basisszenario. Die Verbesserung verringert sich, wenn die Gesamtkosten steigen, wobei sich der Anteil des Verkehrsträgers um 2,75 bzw. 0,55% ändert (für 1\_A\_2 bzw. 1\_B\_2). Bei Anwendung der Kostenstruktur des Taxis beträgt der Anstieg im Schienenverkehr 2,57% für die untere Grenze der Preisspanne (1\_C\_1) und 0,03% für die obere Grenze (1\_C\_2). Wie man sieht, reagiert der Anteil des Verkehrsträgers empfindlicher auf Erhöhungen der Kosten pro Kilometer, was auf die großen Entfernungen zwischen Wohnort und Bahnhof zurückzuführen sein könnte, insbesondere in ländlichen Gemeinden.

Da die Unterschiede im Modalanteil zwischen den Szenarien 1\_A\_1, 1\_A\_2, 1\_B\_1 und 1\_C\_1 sehr gering sind (zwischen 2,57% und 3,01%), wird nur eines dieser Szenarien ausgewählt, um die Verkehrszuweisung durchzuführen und alle Indikatoren abzuleiten. Das gleiche Konzept gilt für die

Szenarien 1\_B\_2, 1\_C\_2 und 1\_C\_3. Wir haben die Szenarien 1\_A\_2 und 1\_C\_2 für die weitere Analyse ausgewählt.

Szenario	Variante	Modal-Split (%)				Diff. zum Basisszenario (%P)
		Flugzeug	PKW	Fernbus	Fernzug	
Basis	-	6,77	77,60	3,56	12,07	-
1_A_1	Fixpreis (1,00€)	6,62	74,88	3,43	15,08	3,01
1_A_2	Fixpreis (3,30€)	6,72	75,09	3,37	14,82	2,75
1_B_1	Preis pro km (0,12€)	6,68	75,08	3,46	14,78	2,71
1_B_2	Preis pro km (1,50€)	6,72	77,09	3,57	12,62	0,55
1_C_1	Fixpreis + Preis pro km (1,00€; 0,12€)	6,60	75,26	3,50	14,64	2,57
1_C_2	Fixpreis + Preis pro km (2,80€; 1,60€)	6,72	77,32	3,60	12,35	0,28
1_C_3	Fixpreis + Preis pro km (4,50€; 2,60€)	6,80	77,53	3,58	12,10	0,03

Tabelle 4-8. Szenario 1 Sensitivitätsanalyse – Modal-Split

#### Indikatoren

Zunächst analysieren wir die Auswirkungen der getesteten Maßnahmen auf die potenzielle Erreichbarkeit (Tabelle 4-9). Wie zu sehen ist, verbesserte sich die durchschnittliche Erreichbarkeit mit dem Zug in allen Szenarien und Raumtypen. Der Anstieg der Zugänglichkeit schwankt zwischen 7,6 Prozentpunkte in städtischen Gemeinden und 9,8 Prozentpunkte in ländlichen Gebieten in Szenario 1\_A\_2 und zwischen 4,2 und 4,6 Prozentpunkte in Szenario 1\_B\_2. In städtischen Gebieten reicht das Verkehrsangebot bereits aus, um Bahnhöfe mit Fernverkehrsverbindungen zu erreichen, so dass die Hinzufügung einer weiteren Zugangsart die Zugänglichkeit weniger stark verbessert als in ländlichen Gemeinden mit schlechteren Verkehrsverbindungen. Die höchste Verbesserung ergibt sich für den Festpreis-Pendelbus. Die Anwendung eines Kilometerpreises für das Ridopooling führte ebenfalls zu einer Verbesserung der Erreichbarkeit, allerdings in geringerem Umfang und mit geringeren Unterschieden zwischen Kernstädten und ländlichen Gemeinden. Dies ist auf die längeren Entfernungen zurückzuführen, die in den ländlichen Gemeinden zurückgelegt werden müssen, um zu den Bahnhöfen zu gelangen, was die Gesamtkosten in größerem Maße erhöht als in den Kernstädten.

Fernzug-Erreichbarkeit	Gemeindetyp	Fernzug Basis	1_A_2		1_C_2	
			Wert	Diff.-zum Basis-szenario (%P)	Wert	Diff.-zum Basis-szenario (%P)
<b>Durchschnitt (%)</b>	Kern- und Großstädte	52,8	61,1	8,3	57,0	4,2
	Mittelstädte	46,4	54,0	7,6	50,7	4,3
	Kleinstädte	40,2	50,5	10,3	44,8	4,6
	Ländliche Gemeinden	37,1	46,9	9,8	41,4	4,3
<b>Maximale (%)</b>	Kern- und Großstädte	72,4	78,2	5,8	77,0	4,6
	Mittelstädte	66,9	75,4	8,5	71,3	4,4
	Kleinstädte	64,8	74,6	9,8	69,3	4,5
	Ländliche Gemeinden	65,6	73,5	7,9	70,3	4,7

Tabelle 4-9. Szenario 1 – Fernzug-Erreichbarkeit

Die Verbesserung der Erreichbarkeit des Fernverkehrs auf der Schiene führte zu einem höheren Anteil von Fahrgästen auf dem Fernzug (Tabelle 4-10). Obwohl sich die durchschnittliche Erreichbarkeit der beiden Szenarien nicht signifikant unterscheidet, ist der Unterschied bei den Modalanteilen ausgeprägter. So stieg der Anteil des Schienenfernverkehrs von 12,07 auf 14,82% in Szenario 1\_A\_2 (Verbesserung um 2,75 Prozentpunkte) und auf 12,35% in Szenario 1\_C\_2 (Verbesserung um 0,28 Prozentpunkte). Die auf die Schiene umgestiegenen Reisenden kamen vor allem vom PKW, das im Festpreisszenario einen Rückgang des Verkehrsanteils um 2,51 Prozentpunkte und im Szenario "Kosten pro Kilometer" einen Rückgang um 0,28 Prozentpunkte verzeichnete. Andere Verkehrsträger sind ebenfalls betroffen, mit geringfügigen Unterschieden bei ihrem Anteil an den Verkehrsstärken. Vergleicht man nur die Landverkehrsträger und den Inlandsverkehr, so sinkt der Anteil des PKW von 83,61% auf 80,81% im Festpreisszenario und auf 83,31% im Szenario mit den Kosten pro Kilometer.

Ziel-Typ	Verkehrsmittel	Basis (%)	1_A_2		1_C_2	
			Wert (%)	Diff.-zum Basisszenario (%P)	Wert (%)	Diff.-zum Basisszenario (%P)
Inland und Ausland	PKW	77,60	75,09	-2,51	77,32	-0,28
	Fernzug	12,07	14,82	2,75	12,35	0,28
	Fernbus	3,56	3,37	-0,19	3,60	0,04
	Flugzeug	6,77	6,72	-0,05	6,72	-0,05
Inland*	PKW	83,61	80,81	-2,80	83,31	-0,30
	Fernzug	13,05	16,05	3,00	13,34	0,29
	Fernbus	3,34	3,14	-0,20	3,35	0,01

\*Inländische Fahrten und der Anteil des Landverkehrs wurden zum Vergleich mit dem aggregierten Modell neu berechnet.

Tabelle 4-10. Szenario 1 – Modal Split

Der Rückgang des PKW-Anteils und die zusätzliche Verkehrsstärken durch den Pendelbus wirkten sich auf die Verkehrsindikatoren (Tabelle 4-11) und die Umweltindikatoren (Tabelle 4-12) aus. Die beiden alternativen Szenarien 1 zeigen keine großen Schwankungen der Überlastungsmuster, wie die geringen Schwankungen des Auslastungsgrad zeigen. Eine Verringerung der PKW-Fahrten, insbesondere im Szenario 1\_A\_2, hat keine großen Auswirkungen auf die Fahrzeugkilometer oder Verlustzeiten. Darüber hinaus führt die Nutzung von Ridepooling zu zusätzlichen Fahrten auf der Straße, so dass die verkehrsbezogenen Indikatoren eine Zunahme der auf anderen Straßen als Autobahnen zurückgelegten Strecke zeigen.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Verkehrsbezogene Indikatoren	Straßentyp	Basis	1_A_2		1_C_2	
			Wert	Diff. zum Basis-szenario (%P)	Wert	Diff. zum Basis-szenario (%P)
<b>Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.5 V/C Auslastung (%)</b>	Autobahnen	20,3	20,7	0,4%P	20,1	-0,2%P
	Bundesstraßen	3,1	3,3	0,2%P	3,2	0,1%P
	Sonstige	1,1	1,1	0,0%P	1,1	0,0%P
<b>Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.75 V/C Auslastung (%)</b>	Autobahnen	3,8	3,4	-0,4%P	3,5	-0,3%P
	Bundesstraßen	0,3	0,4	0,1%P	0,4	0,1%P
	Sonstige	0,4	0,4	0,0%P	0,4	0,0%P
<b>Fahrtleistung des Fernverkehrs (Mio. km/Tag)</b>	Autobahnen	370,2	364,7	-5,5%	367,8	-2,4%
	Bundesstraßen	64,9	66,9	2,0%	65,7	0,8%
	Sonstige	184,8	184,1	-0,7%	191,5	6,7%
<b>Durchschnitt Verlustzeiten im Verkehr durch Stauaufkommen (min)</b>	Autobahnen	8,7	8,3	-0,4%	8,3%	-0,4%
	Bundesstraßen	2,3	2,3	0,0%	2,2%	-0,1%
	Sonstige	8,2	8,1	-0,1%	8,3%	0,1%

Tabelle 4-11. Szenario 1 – Verkehrsbezogene Indikatoren

Die Umweltindikatoren entwickelten sich leicht in die entgegengesetzte Richtung: Während die Schallemissionspegel im Allgemeinen stiegen, gingen die Verkehrsemissionen zurück. Die leichte Verringerung der Verkehrsstärken auf Autobahnen reicht möglicherweise nicht aus, um die Schallemissionspegel unter 80 dB(A) zu senken, wobei die Unterschiede unter 0,01 Prozentpunkten liegen. Der geringere Anstieg in Szenario 1\_C\_2 für alle Straßentypen und die Zunahme des Schalls auf Autobahnen mit weniger Fahrgästen deuten darauf hin, dass der Schallanstieg auf den zusätzlichen Verkehr durch Ridepooling zurückzuführen ist. Andererseits folgten die Verkehrsemissionen demselben Trend wie die Verkehrsstärken. Wir beobachten eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 1,49 Prozentpunkte auf Autobahnen und 1,43 Prozentpunkte auf sonstige Straßen aufgrund der Verringerung des Verkehrs. Auf der anderen Seite stiegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Bundesstraßen um 3,09 Prozentpunkte, was einem ähnlichen relativen Anstieg wie beim Fahrtleistung entspricht.

Umweltbezogene Indikatoren	Straßentyp	Basis	1_A_2		1_C_2	
			Wert	Diff. zum Basis-szenario	Wert	Diff. zum Basis-szenario
<b>Schallemissionspegel:</b>	Autobahnen	91,58	91,85	0,27%P	91,68	0,10%P
<b>Anteil der Straßenlänge von mehr als 80 dB(A) (%)</b>	Bundesstraßen	61,81	62,15	0,35%P	62,14	0,33%P
	Sonstige	16,85	16,94	0,09%P	17,12	0,26%P
<b>Schallemissionspegel: Spitzenstunde (Mittelwert) in dB(A)</b>	Autobahnen	86,59	86,80	0,21%	86,69	0,10%
	Bundesstraßen	69,72	70,09	0,37%	69,93	0,21%
	Sonstige	37,09	37,05	-0,04%	37,16	0,07%
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Tag (Tsd t)</b>	Autobahnen	37,51	36,95	-1,49%	37,27	-0,64%
	Bundesstraßen	6,98	7,20	3,09%	7,07	1,28%
	Sonstige	21,39	21,15	-1,14%	22,12	3,41%
<b>CO-Emissionen pro Tag (t)</b>	Autobahnen	41,67	41,05	-1,49%	41,39	-0,66%
	Bundesstraßen	13,85	14,27	3,06%	14,03	1,26%
	Sonstige	27,16	26,77	-1,43%	28,05	3,28%
<b>HC-Emissionen pro Tag (t)</b>	Autobahnen	2,56	2,52	-1,48%	2,54	-0,64%
	Bundesstraßen	0,62	0,64	3,09%	0,63	1,28%
	Sonstige	1,67	1,65	-1,44%	1,73	3,28%
<b>NO<sub>x</sub>-Emissionen pro Tag (t)</b>	Autobahnen	83,42	82,17	-1,49%	82,88	-0,65%
	Bundesstraßen	18,04	18,59	3,09%	18,27	1,28%
	Sonstige	49,13	48,54	-1,20%	50,79	3,38%
<b>Feinstaub pro Tag (t)</b>	Autobahnen	0,86	0,85	-1,49%	0,86	-0,64%
	Bundesstraßen	0,18	0,18	3,09%	0,18	1,28%
	Sonstige	0,51	0,51	-1,32%	0,53	3,36%

Tabelle 4-12. Szenario 1 – Umweltbezogene Indikatoren

Der Vergleich der CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen der Fernverkehrsmittel ist in Tabelle 4-13 dargestellt. Die Gesamtmenge der CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen wird in Szenario 1\_A\_2 um 40,8 Tonne pro Tag reduziert, was hauptsächlich auf den starken Rückgang der Autoemissionen zurückzuführen ist. Es ist anzumerken, dass die Menge der Emissionen des Schienenverkehrs aufgrund eines höheren Schienenanteils und der zusätzlichen Zu- und Abfahrtsfahrten mit dem Ridepooling, der einen höheren Emissionsfaktor als der Nahverkehr hat, gestiegen ist. Wir konnten jedoch einen Anstieg der Gesamtemissionen in Szenario 1\_C\_2 beobachten. In diesem Szenario wird der Rückgang der Auto- und Luftemissionen nicht durch den Anstieg der Emissionen des Schienenfernverkehrs kompensiert, der hauptsächlich auf die Zu- und Abfahrten mit dem Pendelbus zurückzuführen ist.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Verkehrsmittel	Basis	1_A_2		1_C_2	
		Wert	Diff. zum Basisszenario	Wert	Diff. zum Basisszenario
Flugzeug	51.477,94	50.929,14	-1,07	50.498,15	-1,90
PKW	172.396,10	166.936,4	-3,17	171.968,20	-0,25
Fernbus	1.288,55	1.927,61	49,60	2.100,12	62,98
Fernzug	4.726,18	9.280,23	96,36	6.563,98	38,89
<b>Gesamt</b>	<b>229.888,73</b>	<b>229.073,38</b>	<b>-0,35</b>	<b>231.130,45</b>	<b>0,54</b>

Tabelle 4-13. Szenario 1 – CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen

Der prozentuale Anteil des Einkommens, der für den Verkehr aufgewendet wird, ist in Tabelle 4-14 dargestellt. Es überrascht nicht, dass die Haushalte mit niedrigem sozioökonomischem Status einen höheren Anteil ihres Einkommens für den Verkehr aufwenden. Der Vergleich zwischen dem Basis- und dem 1\_A\_2-Szenario zeigt, dass die Einführung von Ridepooling mit einem niedrigen Festpreis keine der Haushaltsgruppen signifikant beeinflusst. Andererseits wirkt sich die Einführung eines Kilometerpreises in allen Haushaltsgruppen mit Ausnahme der sehr einkommensstarken Gruppe auf den Anteil des Einkommens aus, der für den Transport aufgewendet wird. Die einkommensschwächsten Haushalte erleiden den stärksten Anstieg, von 26,6% ihres Einkommens im Basisszenario auf 27,1% im Basisszenario.

Ökonomischer Status	Basis	1_A_2		1_C_2	
		Wert	Diff. zum Basis-szenario (%P)	Wert	Diff. zum Basis-szenario (%P)
sehr hoch	4,84	4,84	0,00	4,84	0,00
hoch	9,00	9,08	0,08	9,16	0,16
mittel	12,38	12,36	-0,02	12,58	0,20
niedrig	16,93	17,04	0,08	17,24	0,69
sehr niedrig	26,61	26,68	0,07	27,13	0,52

Tabelle 4-14. Szenario 1 – Belastung der Haushalte durch Bepreisung nach Einkommensgruppen

### 832.0.0. — Aggregiertes Modell

Im aggregierten Modell werden für dieses Szenario die Fahrten betrachtet, für die im Basisszenario die öffentlichen Verkehrsmittel für die Zu- oder Abfahrt verwendet wurden. Hier wird nun eine neue Option im Verkehrsmittelwahlmodell hinzugefügt, die den Ridepooling Service mit entsprechenden Kosten darstellt. Sind die Kosten des neuen Ridepooling Services geringer als die des herkömmlichen öffentlichen Verkehrs, wird diese Option für die Zu- und Abfahrt verwendet. Da es in diesem vereinfachten Modell keine separate Verkehrsmittelwahl für das Verkehrsmittel der Zu- und Abfahrt gibt, werden die Anteile der Personen, die für diese Fahrten den privaten PKW bzw. den öffentlichen Verkehr verwenden, beibehalten. Das Verkehrsmittelwahlmodell bezieht sich nur auf die gesamte Strecke und betrachtet, ob sich durch die Einführung des neuen Dienstes

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Änderungen hinsichtlich dieser Fernreise ergeben. Eine differenziertere Betrachtung mit einem eigenen Verkehrsmittelwahlmodell für die Zu- und Abfahrt wäre wünschenswert, bedarf allerdings eines weiteren Modells mit zusätzlicher Kalibrierung.

Die Ergebnisse des aggregierten Modells sind in Tabelle 4-15 dargestellt. Es ist erkennbar, dass sich auch hier nur geringfügige Änderungen in der Modalwahl durch die Einführung eines Ridepooling-Services ergeben. In fast allen Varianten des Szenarios fällt die Veränderung der Verkehrsmittelwahl zugunsten des öffentlichen Verkehrs aus. Lediglich, wenn der Preis für das Ridepooling-Service sehr hoch wird (vergleichbar mit höherpreisigen Taxi-Services) würden sich Personen dagegen entscheiden. In diesem Fall ändern sich die Werte im Modal Split im Vergleich zum Basisszenario nicht.

Szenario	Variante	Modal Split			Diff. zum Basisszenario		
		PKW	Fernbus	Fernzug	PKW	Fernbus	Fernzug
Basis		85,34%	2,93%	11,73%	-	-	-
1_A_1	Fixpreis (1,00€)	82,42%	3,21%	14,37%	-2,92%P	0,28%P	2,64%P
1_A_2	Fixpreis (3,30€)	83,41%	3,04%	13,55%	-1,93%P	0,11%P	1,82%P
1_B_1	Preis pro km (0,12€)	81,23%	2,92%	15,85%	-4,11%P	-0,01%P	4,12%P
1_B_2	Preis pro km (1,50€)	82,32%	3,05%	14,63%	-3,02%P	0,12%P	2,90%P
1_C_1	Fixpreis + Preis pro km (1,00€; 0,12€)	82,78%	3,10%	14,12%	-2,56%P	0,17%P	2,39%P
1_C_2	Fixpreis + Preis pro km (2,80€; 1,60€)	83,44%	3,14%	13,42%	-1,90%P	0,21%P	1,69%P
1_C_3	Fixpreis + Preis pro km (4,50€; 2,60€)	85,38%	2,92%	11,7%	0,04%P	-0,01%P	-0,03%P

Tabelle 4-15. Szenario 1 im aggregierten Modell – Modal Split

Auf Grund der langen Rechenzeiten des Simulationsmodells, wurde nur für zwei Szenarien eine weitere Iteration in SUMO durchgeführt. Diese enthalten aktualisierten Reisezeiten, in denen auch Staus berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der beiden Szenarien sind in Tabelle 4-16 wiedergegeben. Es ist zu erkennen, dass sich auf Grund der erhöhten Reisezeiten für die PKW auch die Verkehrsmittelwahl verändert. Im Vergleich zu den Ergebnissen ohne weitere Iteration erhöht sich der Modal Split des Fernzugs in beiden betrachteten Szenarien noch einmal.

Indikator	Basis	1_A_2		1_C_2	
		Wert	Diff. zum Basisszenario	Wert	Diff. zum Basisszenario

<b>Modal Split – PKW</b>	85,34%	83,04%	-2,30%P	82,95%	-2,39%P
<b>Modal Split – Fernbus</b>	2,93%	2,96%	0,03%P	3,12%	0,19%P
<b>Modal Split – Fernzug</b>	11,73%	14,00%	2,27%P	13,93%	2,20%P
<b>Fahrleistung [Mio. km]</b>	690,64	674,87	-2,28%	674,19	-2,38%
<b>CO<sub>2</sub>-äquivalente [Tsd. t/Tag]</b>	111,10	109,40	-1,53%	109,33	-1,59%

Tabelle 4-16. Szenario 1 in aggregierten Modell – Indikatoren

## 966.0. — Szenario 2

### 967.0.0. — Agentenbasiertes Modell

#### Eingabedaten

Um ein verbessertes Busangebot zu schaffen, haben wir es verworfen, die GTFS-Fahrpläne (und die automatisch generierten MATSim-Fahrpläne) zu ändern, da dies eine vollständige und genaue Definition neuer Linien, Dienste (mit Abfahrtszeiten) und Fahrzeiten zwischen den Haltestellen erfordern würde. Idealerweise sollten die Haltestellen koordiniert werden, um das Umsteigen zwischen den Buslinien zu erleichtern. Dies erwies sich als zu komplex, da die Empfindlichkeit des Verkehrsmittelwahlmodells noch unbekannt war.

Im Gegensatz dazu haben wir die aktuellen Bus-Eingabematrizen geändert, so dass das Fernbusnetz verbessert wird (insbesondere dort, wo es derzeit schwach ist), aber die Details der Verbesserung (welche Dienste mit welchem Fahrplan hinzugefügt werden) werden ignoriert. Das bedeutet, dass das Gesamtnetz verbessert wird, wobei besonderes Augenmerk auf Verbindungen gelegt wird, die derzeit nicht von Bussen bedient werden (keine Haltestellen) oder die keine direkten Busverbindungen zu anderen Zielen haben (zu viele Umstiege oder zu lange Umsteigezeiten).

Für eine Teilstichprobe jedes Start-Ziel-Paares haben wir die aktuellen verkehrsträgerspezifischen Attribute für die Verkehrsträger PKW, Bahn und Bus extrahiert. Wir haben festgestellt, dass der Fernbus die niedrigste Durchschnittsgeschwindigkeit aller Verkehrsträger aufweist. Die Routen der Fernbusse werden in zwei Gruppen unterteilt. Wenn bei einem bestimmten Start-Ziel-Paar mindestens 75% der Reisezeit auf einen Fernbus entfallen, klassifizieren wir das Start-Ziel-Paar als ein Paar mit guten Fernbusverbindungen. Beträgt die Reisezeit mit dem Fernbus weniger als 75% der Gesamtreisezeit, stufen wir es als "ohne Fernbusverkehr" ein (weil auf einem großen Teil der Strecke der öffentliche Nahverkehr genutzt wird, wenn kein Fernbusverkehr vorhanden ist). Die durchschnittliche Reisezeit für beide Arten von Start-Ziel-Paaren, aufgeschlüsselt nach Gemeindetyp, ist in Bild 4-11 dargestellt.

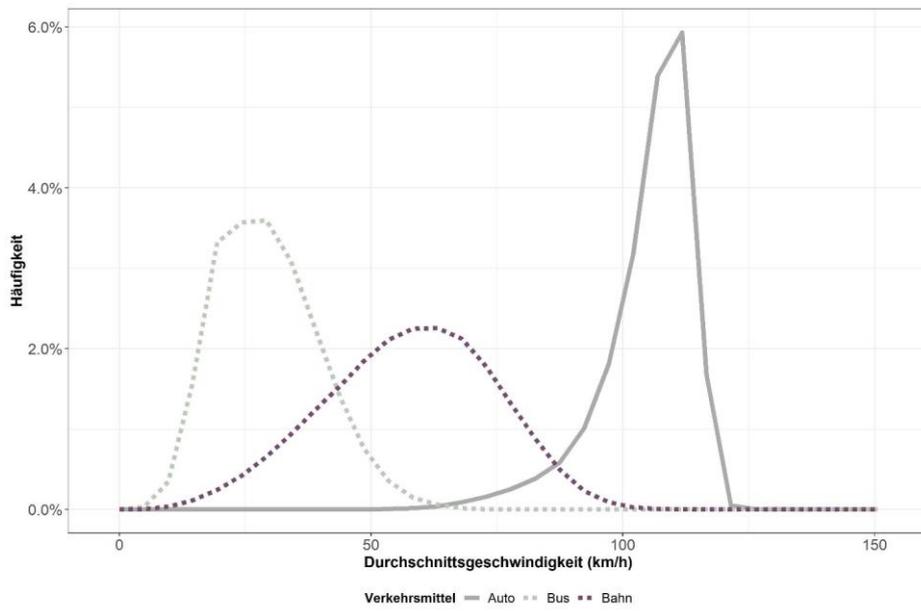


Bild 4-10. Geschwindigkeitsverteilung nach Modus, von 1% aller Start-Ziel-Paare.

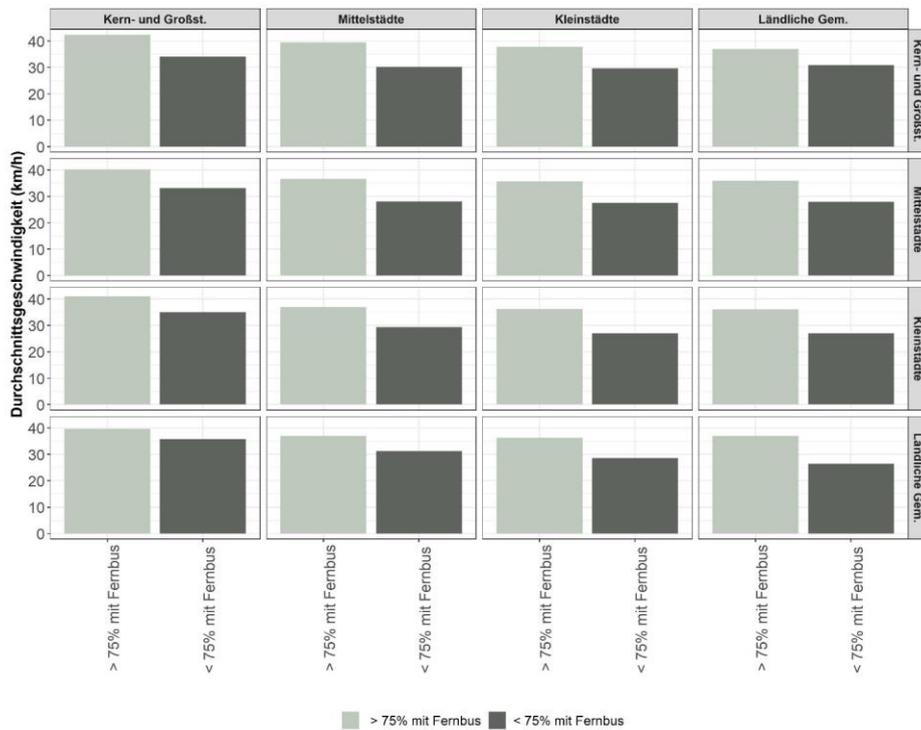


Bild 4-11. Durchschnittsgeschwindigkeit nach Raumtypen (als BBSR-Typ) für Start-Ziel-Paare mit guten und schlechten Fernbusverbindungen.

Auf der Grundlage einer solchen Klassifizierung der Herkunfts-Ziel-Paare nach der Qualität des Busverkehrsdienstes haben wir die Herkunfts-Ziel-Paare mit schlechtem Busverkehr durch eine Erhöhung ihrer kommerziellen Geschwindigkeit verändert. Die Geschwindigkeit jedes Herkunfts-Ziel-Paares mit schlechtem Busangebot wurde mit dem Verhältnis zwischen der Durchschnittsgeschwindigkeit der Herkunfts-Ziel-Paare mit gutem Angebot und der Durchschnittsgeschwindigkeit der Herkunfts-Ziel-Paare mit schlechtem Angebot multipliziert, wie in der Gleichung definiert. Bild 4-12 zeigt die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit im Basisszenario und im Szenario 2, aufgeschlüsselt nach dem Gemeindetyp des Ausgangs- und Zielortes. Wie zu sehen ist, weisen die Fahrten von einer ländlichen Gemeinde in eine andere ländliche Gemeinde den größten Unterschied bei der Durchschnittsgeschwindigkeit auf, was zeigt,

dass ländliche Gemeinde am meisten von diesem Ansatz profitieren, obwohl alle OD-Paare eine Verbesserung der Durchschnittsgeschwindigkeit aufweisen.

$$v_{ij}' = \begin{cases} v_{ij} \cdot \frac{v_g}{v_s} & \text{falls } t_{ij,bus} \geq 0,75 \cdot t_{ij} \\ v_{ij} & \text{falls } t_{ij,bus} < 0,75 \cdot t_{ij} \end{cases} \quad G24$$

wobei:

- $v_{ij}'$  ist die Geschwindigkeit des Busses von Zone i nach Zone j nach Durchführung der Maßnahme
- $v_{ij}$  ist die Geschwindigkeit des Busses von Zone i nach Zone j vor Durchführung der Maßnahme
- $v_g$  ist die Durchschnittsgeschwindigkeit mit einem Bus mit gutem Service
- $v_s$  ist die Durchschnittsgeschwindigkeit mit einem Bus mit schlechtem Service
- $t_{ij,bus}$  ist die Reisezeit im Fernbus
- $t_{ij}$  ist die Gesamtreisezeit

Nach dem Vergleich zwischen Strecken mit niedriger und hoher Servicequalität wurde eine Erhöhung der Geschwindigkeit von 33% ( $v_g/v_s$ ) ermittelt.



Bild 4-12. Durchschnittliche Reisezeiten nach Raumtypen (als BBSR-Typ) für Start-Ziel-Paare, vor und nach der Umsetzung der Maßnahme

### Sensitivitätsanalyse

Die Skim-Matrizen für Busse wurden durch die neue durchschnittliche Reisegeschwindigkeit ersetzt. Zusätzlich haben wir eine Senkung der Mehrwertsteuer für Fernbusse und die Kombination der beiden Maßnahmen getestet. Die Tabelle 4-17 zeigt die Ergebnisse. Der Modalsplit reagierte kaum auf eine Kostensenkung (Abweichung von 0,02 Prozentpunkten zwischen dem Basisszenario und Szenario 2\_A\_1). Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Kosten für Busdienste bereits niedrig sind und die Busverbindungen für einige OD-Paare schlecht sind. Die höchsten Verbesserungen wurden durch die Erhöhung der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit für alle OD-Paare erzielt, mit Änderungen des Modalanteils zwischen 1,60 und 1,77 Prozentpunkten. Wie man sieht, führt die Maßnahme nicht zu großen Unterschieden beim Gesamtanteil der

Verkehrsträger, obwohl die relative Veränderung beim Busanteil erheblich ist (relative Fernbus Modal-Split steigt um 57 %, von 3,56 auf 5,33 Prozent).

Aufgrund der geringen Unterschiede zum Szenario 2\_A\_2 und der geringfügigen Änderungen zwischen dem Basisszenario und dem Szenario 2\_A\_1 wurde das Szenario 2\_A\_3 für die Durchführung der Verkehrszuweisung ausgewählt.

Szenario	Variante	Modal-Split (%)				Diff. zum Basisszenario (%P)
		Flugzeug	PKW	Fernbus	Fernzug	
Basis	-	6,77	77,60	3,56	12,07	-
2_A_1	Preisreduktion (89,9%)	7,17	77,16	3,58	12,09	0,02
2_A_2	Geschwindigkeits-erhöhung	7,15	75,86	5,16	11,83	1,60
2_A_3	Geschwindigkeits-erhöhung + Preisreduktion (89,9%)	7,22	75,82	5,33	11,63	1,77

Tabelle 4-17. Szenario 2 – Sensitivitätsanalyse – Modal-Split

#### Indikatoren

Die getestete Maßnahme verbesserte die Erreichbarkeit für alle Raumtypen. Die ländlichen Gemeinden profitieren am meisten von dieser Maßnahme, mit einem Anstieg der Buszugänglichkeit um 3,9 Prozentpunkte. Die Kernstädte weisen ebenfalls einen erheblichen Anstieg der Erreichbarkeit auf (7,6 Prozentpunkte), wodurch sich das Erreichbarkeitsverhältnis zwischen Kernstädten und ländlichen Gemeinden auf 2,1 gegenüber 2,3 im Basisszenario verringert. Die Erreichbarkeit mit dem Bus ist jedoch immer noch deutlich geringer als die Erreichbarkeit mit dem PKW: Die Durchschnittswerte liegen zwischen 3,9 und 7,6%P, während die Höchstwerte zwischen 10,0 und 12,8%P liegen. Dieses Ergebnis legt nahe, dass weitere Verbesserungen für den Fernbusverkehr vorgeschlagen werden sollten, um diesen Verkehrsträger gegenüber dem PKW wettbewerbsfähig zu machen.

Fernbus-Erreichbarkeit	Gemeindetyp	Basis	2_A_3	
			Wert	Diff. zum Basisszenario (%P)
Durchschnitt (%)	Kern- und Großstädte	15,7	23,3	7,6
	Mittelstädte	10,9	16,8	5,9
	Kleinstädte	8,1	12,6	4,5
	Ländliche Gemeinden	6,8	10,7	3,9
Maximale (%)	Kern- und Großstädte	36,3	49,1	12,8
	Mittelstädte	23,8	34,7	10,9
	Kleinstädte	22,1	32,1	10,0
	Ländliche Gemeinden	21,5	32,2	10,7

Tabelle 4-18. Szenario 2 – Fernbus Erreichbarkeit

Die deutliche Verbesserung der Busanbindung führte zu relativ großen Veränderungen beim Anteil der Fernbusse (Tabelle 4-19). Im Einzelnen stieg der Anteil der Fernbusse von 3,56 auf 5,33%, was einem Anstieg von 1,77 Prozentpunkte entspricht. Obwohl der Anstieg des Anteils des Busses an den Verkehrsstärken sehr signifikant war, war die Verlagerung von anderen Verkehrsträgern aufgrund des anfänglich niedrigen Anteils des Fernbusses nicht allzu groß (absoluter Anstieg um 1,77 Prozentpunkte). Der Fernbus zog mehr Fahrgäste vom PKW an als die Fernbahn (-1,78% gegenüber -0,44% beim PKW). Bei den inländischen Bodenverkehrsmitteln ist die Veränderung des Verkehrsmittelanteils ähnlich wie bei den Inlands- und Auslandsreisen.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Ziel Typ	Verkehrsmittel	Basis (%)	2_A_3	
			Wert (%)	Diff. zum Basisszenario (%P)
Inland und Ausland	PKW	77,60	75,82	-1,78
	Fernzug	12,07	11,63	-0,44
	Fernbus	3,56	5,33	1,77
	Flugzeug	6,77	7,22	0,45
Inland*	PKW	83,61	82,15	-1,46
	Fernzug	13,05	12,64	-0,41
	Fernbus	3,34	5,20	1,86

\*Inländische Fahrten und der Anteil des Landverkehrs wurden zum Vergleich mit dem aggregierten Modell neu berechnet.

Tabelle 4-19. Szenario 2 – Modal Split

Szenario 2 führt nicht zu radikalen Veränderungen im Straßennetz. Wie in Tabelle 4-20, unterscheiden sich die anhand des V/C-Verhältnisses und der zurückgelegten Fahrzeugkilometer gemessenen Überlastungsmuster nur geringfügig vom Basisszenario. Der starke Anstieg des Anteils der Busse an den Verkehrsstärken stellt aufgrund des anfänglich geringen Anteils der Fernbusse keine große Veränderung im Straßenverkehr dar.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Verkehrsbezogene Indikatoren	Straßentyp	Basis	2_A_3	
			Wert	Diff. zum Basisszenario
<b>Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.5 V/C Auslastung (%)</b>	Autobahnen	20.3	19.1	-1,2%P
	Bundesstraßen	3.1	3.0	-0.1%P
	Sonstige	1.1	1.0	-0.1%P
<b>Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.75 V/C Auslastung (%)</b>	Autobahnen	3.8	3.1	-0.7%P
	Bundesstraßen	0.3	0.4	0.1%P
	Sonstige	0.4	0.4	-0.0%P
<b>Fahrleistung (Mio. km/Tag)</b>	Autobahnen	370.2	365.7	-1.2%
	Bundesstraßen	64.9	64.1	-1.2%
	Sonstige	184.8	172.5	-6.7%
<b>Durchschnitt Verlustzeiten im Verkehr durch Stauaufkommen (min)</b>	Autobahnen	8.7	8.7	-0.2%
	Bundesstraßen	2.3	2.3	-2.4%
	Sonstige	8.2	8.3	1.4%

Tabelle 4-20. Szenario 2 – Verkehrsbezogene Indikatoren

Was die Umweltindikatoren betrifft (Tabelle 4-21), so verringerten sich die Verkehrsemissionen durch die getestete Maßnahme um 1,2% auf Autobahnen und Bundesstraßen und um 6,5% auf anderen Straßen. Wie beim ersten Szenario liegt die Veränderung der Verkehrsemissionen in der gleichen Größenordnung wie die Veränderung der Gesamtfahrleistung. Die Schallemissionspegel reagieren kaum auf die Maßnahme, da die Verkehrsstärken nur geringfügig zurückgehen.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Umweltbezogene Indikatoren	Straßentyp	Basis	2_A_3	
			Wert	Diff. zum Basisszenario
Schallemissionspegel: Anteil der Straßenlänge von mehr als 80 dB(A) (%)	Autobahnen	91,58	91,75	0,16%P
	Bundesstraßen	61,81	61,46	-
	Sonstige	16,85	16,53	-0,33%P
Schallemissionspegel: Spitzenstunde (Mittelwert) in dB(A)	Autobahnen	86,59	86,69	0,12%
	Bundesstraßen	69,72	69,64	-0,11%
	Sonstige	37,09	36,63	-1,23%
CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Tag (Tausend t)	Autobahnen	37,51	37,05	-1,23%
	Bundesstraßen	6,98	6,90	-1,22%
	Sonstige	21,39	20,00	-6,50%
CO-Emissionen pro Tag (t)	Autobahnen	41,67	41,14	-1,27%
	Bundesstraßen	13,85	13,68	-1,21%
	Sonstige	27,16	25,35	-6,66%
HC-Emissionen pro Tag (t)	Autobahnen	2,56	2,53	-1,24%
	Bundesstraßen	0,62	0,61	-1,22%
	Sonstige	1,67	1,57	-6,35%
NO <sub>x</sub> -Emissionen pro Tag (t)	Autobahnen	83,42	82,38	-1,24%
	Bundesstraßen	18,04	17,82	-1,21%
	Sonstige	49,13	45,92	-6,53%
Feinstaub pro Tag (t)	Autobahnen	0,86	0,85	-1,23%
	Bundesstraßen	0,18	0,18	-1,22%
	Sonstige	0,51	0,48	-6,50%

Tabelle 4-21. Szenario 2 – Umweltbezogene Indikatoren

Der Vergleich der CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionsszenarien ist in der Tabelle 4-22 dargestellt. Aufgrund der hohen Nachfrage des Fernbusses nimmt die Emissionen zu. Die anderen Verkehrsträger verändern sich leicht. Insgesamt die Emissionen aller Verkehrsträger sinken leicht um 0,20%.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Verkehrsmittel	Basis	2_A_3	
		Wert	Diff. zum Basisszenario (%)
Flugzeug	51.477,9	54.889,2	6,63
PKW	172.396,10	167.382,8	-2,91
Fernbus	1.288,55	2.922,4	126,79
Fernzug	4.726,18	5.154,0	9,05
Gesamt	229.888,73	230.352,2	-0,20

Tabelle 4-22. Szenario 2 – CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen

Durch die Einführung schnellerer Buslinien und die Senkung der Fahrpreise wurde der Anteil des Einkommens, der für allgemeine Reisekosten ausgegeben wird, in allen Einkommensgruppen verringert. Die Maßnahme betrifft mehr Haushalte mit sehr niedrigem und niedrigem sozioökonomischem Status, vor allem, weil sie mehr mit dem Bus fahren als Haushalte mit höherem sozioökonomischem Status und sich sowohl die Fahrzeit als auch die Kosten verbessern. Diese Maßnahme verbessert die Gleichheit unter den Reisenden, indem sie die Kluft zwischen Haushalten mit sehr niedrigem und sehr hohem sozioökonomischem Status verringert (Tabelle 4-23).

Ökonomischer Status des Haushalts	Basis	2_A_3	Diff. zum Basisszenario (%P)
		Wert	
sehr hoch	4,84	4,63	-0,21
hoch	9,00	8,77	-0,23
mittel	12,38	11,93	-0,45
niedrig	16,93	16,29	-0,64
sehr niedrig	26,61	25,71	-0,90

Tabelle 4-23. Szenario 2 – Belastung der Haushalte durch Bepreisung nach Einkommensgruppen

### 1405.0.0. — Aggregiertes Modell

Im aggregierten Modell wurde dieses Szenario analog zum agentenbasierten Modell umgesetzt. Die Preisreduktion durch die Steuersenkung schlägt sich direkt im Fahrpreis der Passagiere nieder. Die Geschwindigkeitserhöhung des Service wurde ebenfalls pauschal auf alle bisher unterhalb des Durchschnitts liegenden Verbindungen angewandt. Als schlechterer Service werden solche Verbindungen angesehen, bei denen weniger als 75% der Reisezeit im Bus verbracht werden. Diese Verbindungen werden um einen entsprechenden Faktor verbessert, womit sich die Reisezeit verringert. Die Ergebnisse des aggregierten Modells sind in Tabelle 4-24 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die reine Preisreduktion, die sich durch eine Steuersenkung von 10% auf 7% ergibt, keine Änderungen im Modalwahlverhalten der Passagiere ergeben. Lediglich in Kombination mit einer Verbesserung des Service kann sich eine Steigerung im Modal Split zugunsten des Fernbusses ergeben.

Der Fernbus ist ohnehin bereits ein sehr günstiges Verkehrsmittel, eine weitere Preisreduktion ist offenbar nicht der entscheidende Faktor, wenn mehr Personen für dieses Verkehrsmittel überzeugt werden sollen. Offenbar spielt die Reisezeit eine größere Rolle. Auch der Komfort kann ein bedeutender Faktor in der Entscheidung sein, dies wird jedoch nicht explizit durch das Modell abgebildet.

Szenario	Variante	Modal Split			Diff. zum Basisszenario		
		PKW	Fernbus	Fernzug	PKW	Fernbus	Fernzug
Basis	-	85,34%	2,93%	11,73%	-	-	-
2_A_1	Preisreduktion (89,9%)	85,32%	2,93%	11,75%	0,02%P	0,00%P	0,02%P
2_A_2	Geschwindigkeits- erhöhung	84,60%	3,74%	11,66%	-0,74%P	0,81%P	-0,07%P
2_A_3	Geschwindigkeits- erhöhung + Preisreduktion (89,9%)	84,60%	3,74%	11,66%	-0,74%P	0,81%P	-0,07%P

Tabelle 4-24. Szenario 2 – Modal Split

Auch in diesem Szenario wurde eine Variante ausgewählt, für die eine zusätzliche Iteration in der Simulation durchgeführt wurde. Auch hier wird deutlich, dass sich durch die realistischeren Bedingungen die Modal Splits nach der Verkehrsmittelwahl noch einmal verändern. Die Reisezeiten der Fernbusse sind stets über die Angaben in den Fahrplänen modelliert und somit bereits in den Ergebnissen aus Tabelle 4-24 relativ realistisch, die Reisezeiten der PKW entsprechen dort jedoch den Reisezeiten bei freiem Verkehr, sie sind somit nach einer weiteren Simulationsiteration (Ergebnisse in Tabelle 4-25) realitätsnäher abgebildet. Der Anteil der Fernbusse steigt nun um 1,9% Punkte im Vergleich zum Basisszenario und erhöht sich damit auf fast 5% im Fernverkehr.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Indikator	Basis	2_A_3	
		Wert	Diff. zum Basisszenario
Modal Split – PKW	85,34%	83,60%	-1,74%P
Modal Split – Fernbus	2,93%	4,78%	1,85%P
Modal Split – Fernzug	11,73%	11,62%	-0,11%P
Fahrleistung [Mio. km]	690,64	678,49	-1,76%
CO <sub>2</sub> -äquivalente [Tsd. t/Tag]	111,10	109,87	-1,11%

Tabelle 4-25. Szenario 2 – Indikatoren

## 1493.0. – Szenario 3

### 1494.0.0. – Agentenbasiertes Modell

#### Eingabedaten

Um diese Maßnahme umzusetzen, haben wir zunächst eine Analyse der von Deutschlandtakt vorgeschlagenen Änderungen durchgeführt. Konkret wurde der Deutschlandtakt Fahrplan mit einem aktuellen Fahrplan für eine Teilstichprobe von möglichen Fahrten verglichen. Es wurde ein durchschnittlicher Werktag (8.12.21) gewählt.

Tabelle 4-26 zeigt eine Teilmenge der untersuchten Zugverbindungen. Die Fahrzeiten und Umsteigezeiten sind auch in Bild 4-13 bzw. Bild 2-14 dargestellt.

**Formatiert:** Deutsch (Deutschland)

Verbindung	Anzahl Umstieg	Reisezeit, 2011	Reisezeit, 2030 (Deutschlandtakt)	Umsteigzeit, 2011	Umsteigzeit, 2030 (Deutschlandtakt)	Änderung Reisezeit
Kassel-Marburg	0	01:10	01:11	-----	-----	1,4%
München-Hamburg	0	05:49	05:32	-----	-----	-4,9%
Basel-Berlin	0	07:14	06:10	-----	-----	-14,7%
Köln-Berlin	0	04:22	04:01	-----	-----	-8,0%
München-Hamburg-Kiel	1	07:11	06:55	00:28	00:21	-3,7%
Freiburg-Dresden	1	06:40	06:17	00:12	00:13	-5,8%
Zittau-Falkenberg	1	02:58	03:08	00:08	00:07	5,6%
Augsburg-Nördlingen	1	01:10	01:08	00:08	00:13	-2,9%
Saarbrücken-Rostock	2	09:36	08:54	00:24	01:16	-7,3%
Sylt-Neumarkt b. Nürnberg	2	08:52	08:28	00:39	01:04	-4,5%
Frankfurt (Oder)-Ilmenau	2	04:40	03:43	00:42	00:21	-20,4%
Cuxhaven-Emden	2	03:59	03:55	00:55	00:49	-1,7%

Tabelle 4-26. Reisezeiten und Umsteigezeiten in einer Teilstichprobe von Reisen

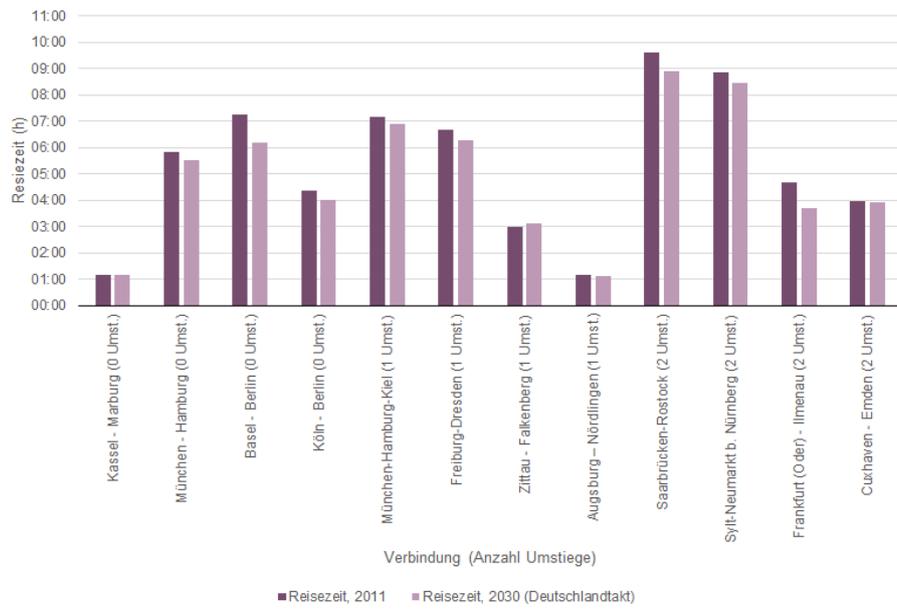


Bild 4-13. Vergleich der Reisezeiten

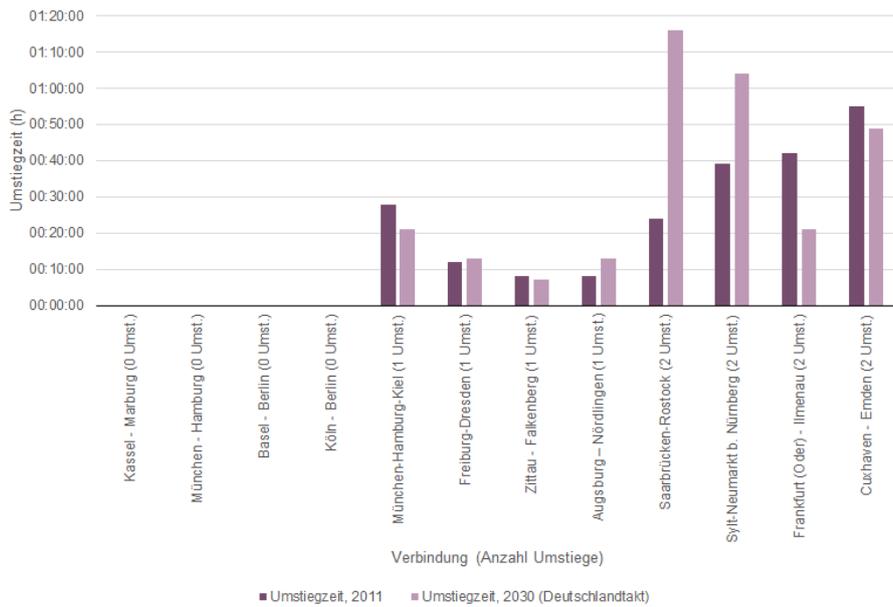


Bild 4-14. Vergleich der Umsteigezeiten

Die Analyse der Teilstichprobe von Zugverbindungen zeigt begrenzte Veränderungen der Reisezeit mit einer durchschnittlichen Verringerung von etwa 5% (der im Fern- und Regionalverkehr verbrachten Zeit, ohne Zu- und Ausstiegszeit). Bei der Verringerung der Umsteigezeiten ist kein klarer Trend zu erkennen, obwohl zu erwarten ist, dass die Anschlüsse zwischen den Zugverbindungen weiter verbessert werden, sobald der endgültige Fahrplan erstellt ist. Eine wichtige Einschränkung für unser Modell der Verkehrsmittelwahl besteht darin, dass die Nachfrageänderungen nur durch Änderungen der Variablen zu erwarten sind, die in den Erhebungsdaten gemessen wurden und die nach der Modellschätzung statistisch signifikant waren. Dabei handelt es sich nur um die Reisezeit und die Reisekosten, die zu allgemeinen Kosten zusammengefasst werden. Daher können andere Verbesserungen, die mit der Umsetzung des Deutschlandtaktes zusammenhängen, nicht durch das Modell erfasst werden. Beispiele für diese Verbesserungen sind eine höhere Zuverlässigkeit des Systems oder eine bessere Lesbarkeit der Fahrpläne durch die Fahrgäste (z.B. wenn die Züge immer im 30-, 60- oder 120-Minuten-Takt abfahren).

Als Ergebnis der vorläufigen Analyse von Deutschlandtakt haben wir beschlossen, zwei Maßnahmen zu testen: eine Verkürzung der Umsteigezeit und eine Erhöhung der Reisegeschwindigkeit für alle Verbindungen. Dazu wurden die Eingabedaten so transformiert, dass sie Veränderungen in der Reisezeit und der Anzahl der Umstiege darstellen. Jede potenzielle Fahrt im Fernverkehrsmodell wird neben der Gesamtreisezeit vom Start zum Zielort durch mehrere zusätzliche Variablen definiert, die Zwischenstopps, Wartezeiten sowie Zu- und Abfahrten beschreiben. Diese sind in Bild 4-15. zusammenfassend dargestellt. Zusätzlich sind die Anzahl der Umsteigevorgänge und deren Häufigkeit bekannt. Die Informationen werden für jedes Start-Ziel-Paar in Form von Matrizen gespeichert.

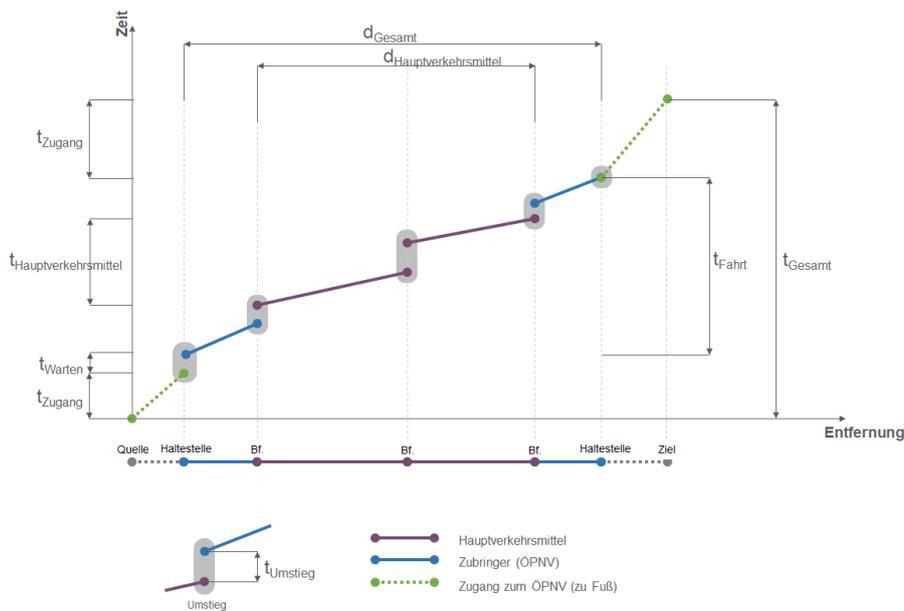


Bild 4-15. Angebotsbezogene Variablen einer Beispiel-Fernreise

Eine allgemeine Verringerung der Reisezeit kann vorgenommen werden, indem die Gesamtreisezeit (ohne Zu- und Abgang zu Fuß) mit dem gewählten Verringerungsfaktor multipliziert und die Einsparungen beim Umsteigen abgezogen werden.

Auf der Grundlage des zuvor beschriebenen Ansatzes haben wir eine vorläufige Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um die Veränderungen bei den Anteilen der Verkehrsträger zu

messen, wenn die oben genannten Änderungen (Verkürzung der Reisezeit und Reduzierung der Umsteigezeiten) umgesetzt werden.

Bild 4-16 zeigt, wie die durchschnittliche Reisezeit mit der Bahn in den verschiedenen Szenarien aussieht. Wie zu sehen ist, verbessern die Maßnahmen nicht nur die durchschnittliche Reisezeit.

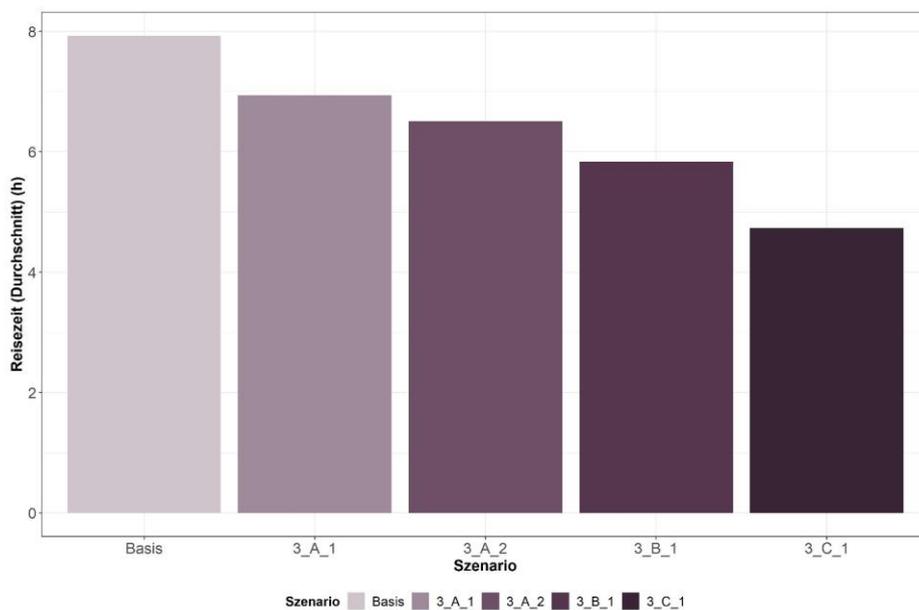


Bild 4-16. Durchschnittliche Reisezeit (von 1% aller Quelle-Ziel Kombinationen) vor und nach der Implementierung des Szenarios 3-

### Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse zum Modal Split der verbesserten Reisegeschwindigkeit und Umsteigezeiten sind in der Tabelle 4-27 zusammengefasst. Das Ziel der Verdoppelung der Fahrgäste des Basisszenarios wird nur mit dem Extremszenario erreicht, das eine Verdoppelung der Geschwindigkeit der Fernverkehrszüge vorsieht. Das konservative Szenario, das von einer Verbesserung der Geschwindigkeit der Fernverkehrszüge um 10% ausgeht, führte zu einem Anstieg des Bahnanteils um 1,42 Prozentpunkte. Die Verlagerung auf die Schiene war bei den Autofahrern ausgeprägter, deren Anteil an den Verkehrsstärken im Szenario 3\_A\_1 um 1,27

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Prozentpunkte und im Szenario 3\_C\_1 um 7,93 Prozentpunkte zurückging. Die Zahl der Fahrgäste im Busfernverkehr ging ebenfalls zurück, je nach Szenario um bis zu 0,31 Prozentpunkte.

Für die Verkehrsaufteilung haben wir das konservative Szenario 3\_A\_1 und das Extremszenario 3\_C\_1 gewählt.

Szenario	Variante	Modal Split (%)				Diff. zum Basiszenario (%P)
		Flugzeug	PKW	Fernbus	Fernzug	
Basis	-	6,77	77,60	3,56	12,07	-
3_A_1	Reduktion um 10% der Reisezeit und 5 Minuten/Umstieg	6,74	76,33	3,43	13,49	1,42
3_A_2	Reduktion um 10% der Reisezeit und 10 Minuten/Umstieg	6,75	76,42	3,52	13,31	1,24
3_B_1	Reduktion um 30% der Reisezeit und 5 Minuten/Umstieg	6,59	73,50	3,35	16,56	4,49
3_C_1	Reduktion um 50% der Reisezeit und 5 Minuten/Umstieg	6,29	69,67	3,25	20,79	8,72

Tabelle 4-27. Szenario 3 Sensitivitätsanalyse – Modal Split

#### Indikatoren

Tabelle 4-28 zeigt die Erreichbarkeitsergebnisse von Szenario 3. Wie in den vorangegangenen Szenarien ist die Zugänglichkeit in den ländlichen Gemeinden am stärksten gestiegen, obwohl die Unterschiede zwischen Kernstädten und ländlichen Gemeinden geringer sind. Die durchschnittliche Erreichbarkeit mit der Bahn verbesserte sich in den Kernstädten für Szenario 3\_A\_1 auf 57% und für Szenario 3\_C\_1 auf 78,5%. Wir können auch Verbesserungen bei der maximalen Erreichbarkeit mit der Bahn feststellen, die in Szenario 3\_C\_1 nahe an der maximalen Erreichbarkeit mit dem Auto liegt. Auch wenn sich die Unterschiede zum PKW im Extremszenario deutlich verringern, ist der PKW aufgrund seiner höheren allgemeinen Reisezeit im Durchschnitt immer noch wettbewerbsfähiger als die Bahn.

Fernzug-Erreichbarkeit Gemeindetyp	Basis	3_A_1		3_C_1		
		Wert	Diff. zum Basis-szenario (%P)	Wert	Diff. zum Basis-szenario (%P)	
<b>Durchschnitt (%)</b>	Kern- und Großstädte	52,8	57,0	4,2	78,5	25,7
	Mittelstädte	46,4	50,5	4,1	71,5	25,1
	Kleinstädte	40,2	43,9	3,7	63,5	23,3
	Ländliche Gemeinden	37,1	40,7	3,6	59,6	22,5
<b>Maximale (%)</b>	Kern- und Großstädte	72,4	77,0	4,6	99,5	27,1
	Mittelstädte	66,9	71,3	4,4	93,0	26,1
	Kleinstädte	64,8	69,3	4,5	92,0	27,2
	Ländliche Gemeinden	65,6	70,3	4,7	93,4	27,8

Tabelle 4-28. Szenario 3 – Fernzug Erreichbarkeit

Der Anstieg der Zugänglichkeit des Fernverkehrs führt zu einem höheren Anteil des Fernverkehrs (Tabelle 4-29). Konkret stieg der Anteil der Bahnreisenden im Szenario 3\_A\_1 um 1,42 Prozentpunkte. Es sei darauf hingewiesen, dass die Verbesserung der durchschnittlichen Zugänglichkeit der Bahn weniger als 10% betrug. Was die Verlagerung auf andere Verkehrsträger anbelangt, so ging der Anteil des PKW-Verkehrs am stärksten zurück (-1,27 Prozentpunkte), während der Anteil des Fernbusverkehrs und des Luftverkehrs nur geringfügig zurückging. Die Auswirkungen der Maßnahme zur Verringerung der Zahl der Autofahrten waren im konservativen Szenario nicht allzu groß. Im Extremszenario verdoppelt sich der Anteil des Schienenverkehrs fast, mit einem Wert von 20,79%. Wie im konservativen Szenario verlagerten sich die Fahrgäste aller Verkehrsträger auf die Schiene, obwohl der stärkste Rückgang beim PKW zu verzeichnen war (7,93 Prozentpunkte weniger). Ein ähnliches Muster lässt sich auch bei der Betrachtung der inländischen Bodenreisen beobachten.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Ziel-Typ	Mode	Basis(%)	3_A_1		3_C_1	
			Wert(%)	Diff. zum Basisszenario (%P)	Wert(%)	Diff. zum Basisszenario (%P)
Inland und Ausland	PKW	77,60	76,33	-1,27	69,67	-7,93
	Fernzug	12,07	13,49	1,42	20,79	8,72
	Fernbus	3,56	3,43	-0,13	3,25	-0,34
	Flugzeug	6,77	6,74	-0,03	6,29	-0,48
Inland*	PKW	83,61	82,27	-1,34	74,80	-8,81
	Fernzug	13,05	14,50	1,45	22,12	9,07
	Fernbus	3,34	3,23	-0,11	3,08	-0,26

\*Inländische Fahrten und der Anteil des Landverkehrs wurden zum Vergleich mit dem aggregierten Modell neu berechnet.

Tabelle 4-29. Szenario 3 – Modal Split

Tabelle 4-30 zeigt die Veränderungen der Verkehrsindikatoren nach der Umsetzung von Szenario 3. Das Szenario 3\_A\_1 hat eine begrenzte Auswirkung auf den Modal Split, da sich die Reisezeiten

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

der Bahn nur geringfügig verkürzen. Das hypothetische Szenario 3\_C\_2 führt jedoch zu einem starken Anstieg der Bahnfahrten, was eine konsequente Verringerung des Verkehrs auf allen Straßentypen zur Folge hat. Infolgedessen wird die Überlastung deutlich verringert, die Fahrzeugkilometer sind niedriger und die Verspätungen werden reduziert.

Verkehrsbezogene Indikatoren	Straßentyp	Basis	3_A_1		3_C_1	
			Wert	Diff. zum Basisszenario	Wert	Diff. zum Basisszenario
<b>Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.5 V/C Auslastung (%)</b>	Autobahnen	20,3	20,3	0,0%P	15,2	-5,1%P
	Bundesstraßen	3,1	3,2	0,1%P	2,9	-0,2%P
	Sonstige	1,1	1,1	0,0%P	1,0	-0,1%P
<b>Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.75 V/C Auslastung (%)</b>	Autobahnen	3,8	3,1	-0,7%P	2,2	-1,6%P
	Bundesstraßen	0,3	0,4	0,1%P	0,4	0,1%P
	Sonstige	0,4	0,4	0,0%P	0,4	0,0%P
<b>Fahrtleistung des Fernverkehrs (Mio. km/Tag)</b>	Autobahnen	370,2	364,8	-1,5%	315,4	-14,85
	Bundesstraßen	64,9	62,7	-3,3%	57,1	-12,0%
	Sonstige	184,8	188,1	1,8%	178,1	-3,6%
<b>Durchschnitt-Verlustzeiten im Verkehr durch Stauaufkommen (min)</b>	Autobahnen	8,7	8,6	-1,2%	8,1	-6,9%
	Bundesstraßen	2,3	2,3	-2,2%	2,2	-3,9%
	Sonstige	8,2	8,1	-0,8%	8,0	-1,6%

Tabelle 4-30. Szenario 3 – Verkehrsbezogene Indikatoren

Das Extremszenario 3\_C\_1 führte zu einer Verringerung des Anteils des PKW-Verkehrs um 7,0%; und obwohl die Größenordnung beträchtlich ist, ist sie noch weit davon entfernt, die Straßenverkehrsemissionen um die Hälfte zu reduzieren (Tabelle 4-31). Die verkehrsbedingten CO<sub>2</sub> Emissionen wurden auf den Autobahnen um 14,8% und auf den Bundesstraßen um 12,1% reduziert. Beim konservativen Szenario konnten wir Emissionsminderungen zwischen 0,23 und 0,56 Tonnen auf Bundesstraßen und Autobahnen feststellen, was einer Verringerung zwischen 1,5 und 3,3% im Vergleich zum Basisszenario entspricht. Was den Schall betrifft, so bleibt der Prozentsatz des Straßennetzes über 80 dB(A) konstant, und es gibt einige geringfügige Verringerungen des durchschnittlichen Schallwertes in der Spitzenstunde, insbesondere auf den Bundesstraßen.

Indikatoren	Straßentyp	Basis	3_A_1		3_C_1	
			Wert	Diff. zum Basisszenario	Wert	Diff. zum Basisszenario
<b>Schallemissionspegel: Anteil der Straßenlänge von mehr als 80 dB(A) (%)</b>	Autobahnen	91,58	91,64	0,06%P	91,48	0,10%P
	Bundesstraßen	61,81	61,18	-0,62%P	60,81	0,998%P
	Sonstige	16,85	16,76	-0,09%P	16,69	0,16%P
<b>Schallemissionspegel: Spitzenstunde (Mittelwert) in dB(A)</b>	Autobahnen	86,59	86,60	0,02%	86,25	-0,39%
	Bundesstraßen	69,72	69,54	-0,26%	69,31	-0,59%
	Sonstige	37,09	36,83	-0,71%	36,73	-0,98%
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Tag (Tausend t)</b>	Autobahnen	37,51	36,95	-1,47%	31,94	-14,84%
	Bundesstraßen	6,98	6,75	-3,33%	6,14	-12,05%
	Sonstige	21,39	21,64	1,14%	20,63	-3,57%
<b>CO-Emissionen pro Tag (t)</b>	Autobahnen	41,67	41,04	-1,51%	35,47	-14,88%
	Bundesstraßen	13,85	13,39	-3,33%	12,19	-12,02%
	Sonstige	27,16	27,52	1,35%	26,20	-3,53%
<b>HC-Emissionen pro Tag (t)</b>	Autobahnen	2,56	2,52	-1,49%	2,18	-14,85%
	Bundesstraßen	0,62	0,60	-3,34%	0,55	-12,05%
	Sonstige	1,67	1,69	0,85%	1,61	-3,71%
<b>NO<sub>x</sub>-Emissionen pro Tag (t)</b>	Autobahnen	83,42	82,18	-1,48%	71,02	-14,86%
	Bundesstraßen	18,04	17,44	-3,33%	15,87	-12,04%
	Sonstige	49,13	49,71	1,18%	47,38	-3,56%
<b>Feinstaub pro Tag (t)</b>	Autobahnen	0,86	0,85	-1,48%	0,73	-14,84%
	Bundesstraßen	0,18	0,17	-3,33%	0,16	-12,05%
	Sonstige	0,51	0,52	1,07%	0,49	-3,51%

Tabelle 4-31. Szenario 3 – Umweltbezogene Indikatoren

Der Vergleich der CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionsszenarien ist in der Tabelle 4-32 dargestellt. Aufgrund der hohen Emissionsreduzierung im Flugzeug- und PKW wurden die Gesamtemissionen um 8,55% reduziert. Derselbe Trend wurde bei Szenario 3\_A\_1 beobachtet, wenngleich der Umfang der Veränderung geringer war. Insgesamt wurden die Emissionen um -0,56% reduziert. In beiden Fällen stiegen die Emissionen durch die Erhöhung des Verkehrsanteils von Bus und Bahn.

Verkehrsmittel	Basis	3_A_1		3_C_1	
		Wert	Diff. zum Basisszenario (%)	Wert	Diff. zum Basisszenario (%)
<b>Flugzeug</b>	51.477,9	50.804,99	-1,31	47.712,42	-7,31
<b>PKW</b>	172.396,10	169.615,90	-1,61	150.188,10	-12,88
<b>Fernbus</b>	1.288,55	2.001,98	55,37	1.809,76	40,45
<b>Fernzug</b>	4.726,18	6.175,10	30,66	10.519,16	122,57
<b>Gesamt</b>	229.888,73	228.597,98	-0,56	210.229,44	-8,55

Tabelle 4-32. Szenario 3 – CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen

Wie bei den vorangegangenen Indikatoren sind die signifikantesten Veränderungen beim Verhältnis zwischen Kosten und Einkommen im Szenario 3\_C\_1 zu beobachten, wo dieses Verhältnis für alle sozioökonomischen Gruppen verringert wird (Tabelle 4-33). Interessanterweise sind von dieser Maßnahme die Haushalte mit sehr niedrigem und niedrigem sozioökonomischem Einkommen am positivsten betroffen. Obwohl Haushalte mit hohem Einkommen ebenfalls von kürzeren Reisezeiten

und somit von einer geringeren Gesamtreisezeit profitieren, ist ihre Verlagerung auf die Bahn geringer als bei Haushalten mit niedrigem Einkommen. Andererseits führt das realistische Szenario zu nicht signifikanten Unterschieden für Haushalte mit hohem und sehr hohem Einkommen und zu einem leichten Anstieg der Kosten für Haushalte mit sehr niedrigem sozioökonomischem Status. Dies könnte auf die Verlagerung von einem billigeren Verkehrsmittel wie dem Bus auf die Bahn zurückzuführen sein, bei der die Verbesserung der Reisezeit den Anstieg der Reisekosten nicht vollständig kompensiert.

Ökonomischer Status des Haushalts	Basis	3_A_1		3_C_1	
		Wert	Diff. zum Basisszenario (%P)	Wert	Diff. zum Basisszenario (%P)
sehr hoch	4,84	4,81	-0,03	4,51	-0,33
hoch	9,00	9,00	0,00	8,73	-0,27
mittel	12,38	12,25	-0,13	11,54	-0,84
niedrig	16,93	16,61	-0,32	15,57	-1,36
sehr niedrig	26,61	26,72	0,11	24,76	-1,85

Tabelle 4-33. Szenario 3 – Belastung der Haushalte durch Bepreisung nach Einkommensgruppen

### 2171.0.0. Aggregiertes Modell

Im aggregierten Modell wird der Open Trip Planner verwendet, um die Reisezeiten mit dem öffentlichen Verkehr zu errechnen. Diese Ausgaben aus OTP beinhalten sowohl die gesamte Reisezeit, als auch Wartezeiten durch Umsteigevorgänge. Aus diesem Grund können in dem Modell sowohl die Szenariovarianten implementiert werden, die eine Reduktion der Umsteigezeiten in absoluten Werten beinhalten, als auch diejenigen mit prozentualen Änderungen der Umsteigezeiten.

Zunächst wurden die Wartezeiten der Umstiege für die einzelnen Fahrten berechnet, bzw. aus OTP extrahiert. Fahrten ohne Umstiege entfallen in der Betrachtung. Dann wurden die Umsteigezeiten entsprechend der betrachteten Variante des Szenarios geändert. Diese Änderung geschieht im aggregierten Modell direkt durch eine Änderung der gesamten Reisezeit, da die Wartezeit in diesem Modell keinen eigenen Modellparameter darstellt. Im Anschluss daran wird auch die Änderung der Reisezeit auf diese neu berechnete Reisezeit angewendet. Schließlich werden Verkehrsmittelwahl und Umlegung mit den modifizierten Reisezeiten erneut gerechnet.

Dieses Szenario gibt in einer vereinfachten Form die Zeile des Deutschlandtakts wieder. In den verschiedenen Varianten des Szenarios wurden unterschiedliche Reduktionen in Reise- und Umsteigezeit getestet. Im Gegensatz zum agentenbasierten Modell konnte im aggregierten Modell auch die Umsteigezeit prozentual verändert werden. Daher gibt es eine weitere Variante des

Szenarios, die mit 3\_D\_1 bezeichnet wird. In Tabelle 4-34 sind die Ergebnisse des Verkehrsmittelwahlmodells zur Sensitivitätsanalyse des aggregierten Modells zusammengefasst.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Szenario	Variante	Modal Split			Diff. zum Basisszenario		
		PKW	Fernbus	Fernzug	PKW	Fernbus	Fernzug
Basis	-	85,34%	2,93%	11,73%	-	-	-
3_A_1	Reduktion um 10% der Reisezeit und 5 Minuten/Umstieg	84,12%	2,92%	12,96%	-1,22%P	0,01%P	1,23%P
3_A_2	Reduktion um 10% der Reisezeit und 10 Minuten/Umstieg	83,83%	2,88%	13,29%	-1,51%P	-0,05%P	1,56%P
3_B_1	Reduktion um 30% der Reisezeit und 5 Minuten/Umstieg	82,34%	2,83%	14,83%	-3,00%P	-0,10%P	3,10%P
3_C_1	Reduktion um 50% der Reisezeit und 5 Minuten/Umstieg	80,11%	2,72%	17,17%	-5,23%P	-0,21%P	5,44%P
3_D_1	Reduktion um 10% der Reisezeit und 30% Umsteigezeit	84,34%	2,92%	12,74%	-1,00%P	0,01%P	1,01%P

Tabelle 4-34. Szenario 3 des aggregierten Modells—Modal Split

Signifikante Änderungen in der Verkehrsmittelwahl können nur erreicht werden, wenn auch signifikante Änderungen im Service der Bahn geboten werden. Insbesondere die Reisezeit ist hierbei entscheidend. Jedoch ergibt auch eine Reisezeitminderung um 30% lediglich eine Änderung des Anteils der Bahn im Modal Splits um 3,1 Prozentpunkte. In diesem Szenario wurden drei Varianten mit zusätzlichen SUMO-Iterationen simuliert. Die Ergebnisse daraus sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Indikator	Basis	3_A_1		3_C_1		3_D_1	
		Wert	Diff. zum Basis-szenario	Wert	Diff. zum Basis-szenario	Wert	Diff. zum Basis-szenario
Modal Split - PKW	85,34%	83,92%	-1,42%P	79,52%	-5,82%P	83,98%	-1,36%P
Modal Split - Fernbus	2,93%	2,89%	-0,04%P	2,74%	-0,19%P	2,91%	-0,02%P
Modal Split - Fernzug	11,73%	13,19%	1,46%P	17,74%	6,01%P	13,11%	1,38%P
Fahrleistung [Mio. km]	690,64	680,54	-1,46%	649,08	-6,02%	681,01	-1,39%
CO <sub>2</sub> -äquivalente [Tsd. t/Tag]	111,10	110,00	-0,99%	106,52	-4,12%	110,05	-0,95%

Tabelle 4-35. Szenario 3 des aggregierten Modells—Indikatoren

Sogar die voraussichtlich nicht realistische Annahme einer Reisezeitminderung um 50% und einer sehr geringen Umsteigezeit ergibt nur eine 6% Punkte Änderung im Modal Split für den Fernzug. Es wird deutlich, dass es viele weitere Faktoren gibt, auf Grund derer Menschen sich für ein bestimmtes Verkehrsmittel entscheiden. Solche Faktoren wie beispielsweise Komfort, Sicherheit

~~oder Zuverlässigkeit können jedoch in einem vereinfachten Verkehrsmittelwahlmodell nicht abgebildet werden.~~

## ~~2303.0. Szenario 4~~

### ~~2304.0.0. Agentenbasiertes Modell~~

#### ~~Eingabedaten~~

~~In diesem Szenario haben Autofahrer zwei Möglichkeiten: Sie können auf mautpflichtigen Autobahnen fahren und sie können nur auf nicht mautpflichtigen Straßen fahren. Dies erfordert eine Änderung des Routers, der die Reisezeiten berechnet, um die beiden möglichen Verhaltensweisen zu berücksichtigen und die Entfernung nach Mautgebühren zu berechnen.~~

~~Zu diesem Zweck wird zunächst das Netz so geändert, dass die Mautstraßen berücksichtigt werden. Jede der Verbindungen des Netzes muss mit einem solchen Attribut versehen werden ("Mautstraße" gleich true oder false). Das Attribut kann mit dem Straßentyp verknüpft werden (z. B. wenn Straßen zur OpenStreetMaps-Kategorie "Autobahn" gehören, sind sie mautpflichtige Straßen).~~

~~Die Berechnung solcher Matrizen erfolgt dann in ähnlicher Weise wie zuvor für nicht mautpflichtige Straßen: eine Schleife von jedem Ausgangspunkt zu jedem Ziel und Berechnung des kürzesten Weges. Neben der Zeit und der Entfernung vom Ausgangspunkt zum Zielort wird nun auch die auf einer mautpflichtigen Straße zurückgelegte Strecke ermittelt. Für den Fall, dass das Fahren auf einer mautpflichtigen Straße vermieden wird, werden Straßenverbindungen, die auf mautpflichtigen Straßen liegen, stark benachteiligt, so dass die Berechnung des kürzesten Weges alternative Routen findet (Bild 4-17).~~

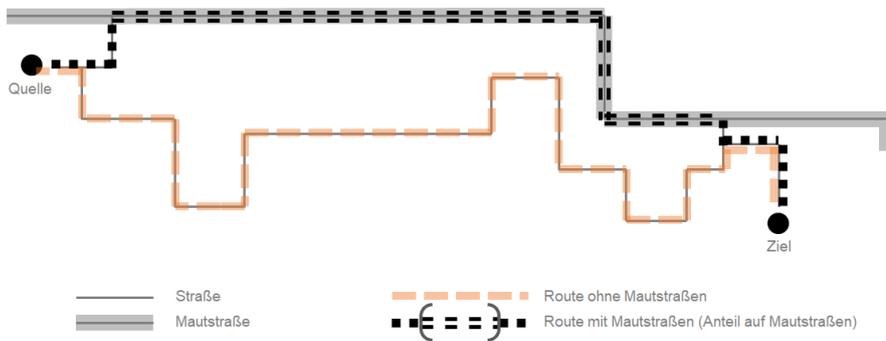


Bild 4-17. Route mit und ohne Maut

Die Berechnung der Reisezeit und Entfernungsmatrizen erfolgt mit MATSim. Sobald die Routen mit und ohne Maut gefunden sind, werden die Kosten der Reise gemäß Gleichung G25:

$$K_T = d_g \cdot K_G + d_m \cdot K_m \quad \text{G25}$$

wobei:

- $K_T$  ist der Preis für die PKW-Fahrt in €
- $d_g$  ist die Gesamtstrecke in km
- $K_G$  sind die Betriebskosten pro km. In unserem Fall sind sie gleich 0,08€/km
- $d_m$  ist die auf mautpflichtigen Autobahnen zurückgelegte Strecke in km
- $K_m$  sind die Mautkosten pro km, in €/km

Wir haben die Eingabedaten für das Szenario, bei dem alle Autobahnen mautpflichtig sind (Szenario 4\_A) und für das Szenario, bei dem sowohl Autobahnen als auch andere Bundesstraßen mautpflichtig sind (Szenario 4\_B) generiert.

Bild 4-18 und Bild 4-19 zeigen die durchschnittliche Reisezeit und die Reisekosten einer Teilstichprobe von etwa 100.000 Start-Ziel-Paaren innerhalb Deutschlands.

Wie erwartet, ist die Reisezeit der Nutzer, die Mautgebühren zahlen, kürzer als die der Nutzer, die Mautgebühren vermeiden. Insbesondere verkürzt sich die durchschnittliche Reisezeit um etwa 20%, wenn nur Autobahnen mautpflichtig sind, und um fast 100%, wenn Autobahnen und Bundesstraßen mautpflichtig sind. Die Verkürzung der Reisezeit geht mit höheren Gesamtkosten für die Reise

aufgrund der Maut einher. Die Unterschiede sind jedoch nicht allzu groß, da Reisende, die keine Mautgebühren zahlen, längere Strecken zurücklegen müssen, wodurch sich auch ihre Reisekosten erhöhen. Bei den Autobahnen und Bundesstraßen mit Maut sind die Gesamtkosten mit und ohne Maut ähnlich.

Der Vergleich der Kosten zum Basisszenario (blaue Linie in Bild 4-19) zeigt, dass die Maut auf Autobahnen (links) wenig die Kosten von Fahrern beeinflusst, die die Maut vermeiden möchten. Die Bundesstraßen bieten eine kostenlose Alternative, die noch relativ schnell und direkt ist (unter die Annahme dass die Verkehrsüberlastung noch nicht zugenommen hat). Das ist nicht der Fall, wenn die Maut auf Autobahnen und Bundesstraßen implementiert wird (rechts). In diesem Fall wird das Fahren auf Mautstraßen teurer, aber auch die Vermeidung der Maut, weil die kostenlosen alternativen Routen deutlich länger sind.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

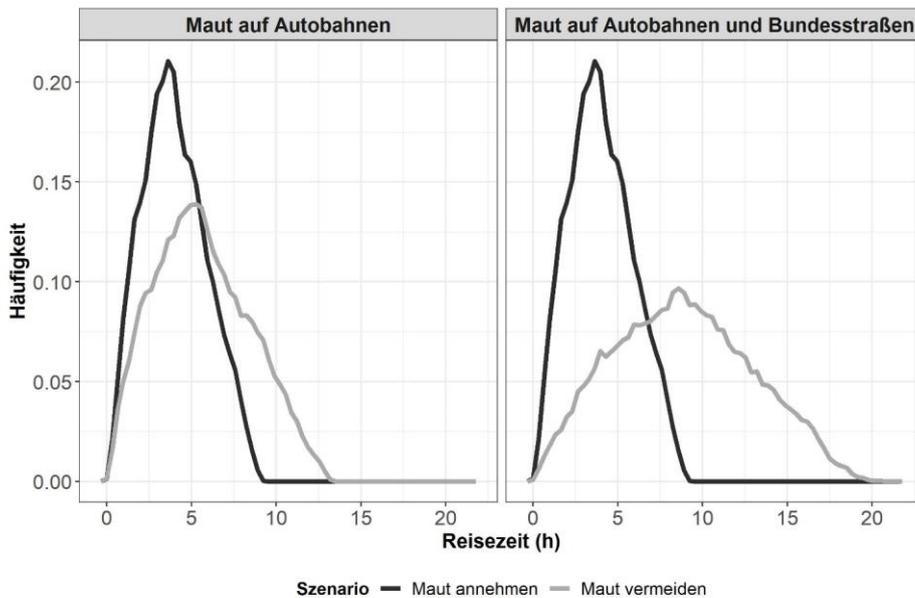


Bild 4-18. Verteilung der Fahrzeiten auf Routen mit und ohne Maut

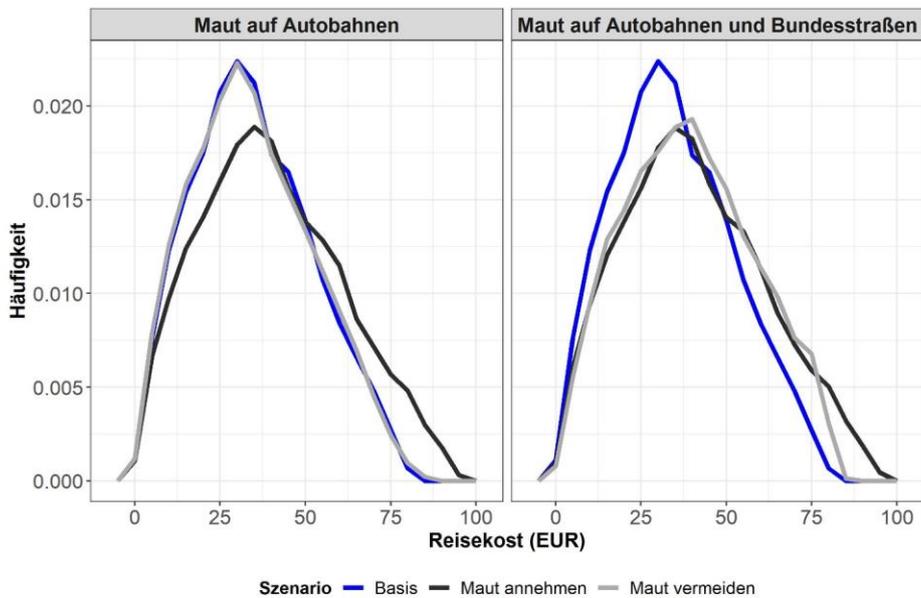


Bild 4-19. Verteilung der Reisekosten auf Routen mit und ohne Maut (Fahrtkosten 0.08 €/km und Mautkosten 0.015 €/km).

#### Integration in das Verkehrsmittelwahlmodell

Um die Überschätzung des Autoanteils durch die Einführung von gebührenpflichtigen und nicht gebührenpflichtigen Straßen in das multinomiale Logit-Modell zu vermeiden, haben wir das derzeitige Verkehrsmittelwahlmodell in ein verschachteltes Verkehrsmittelwahlmodell umgewandelt, indem wir eine Verschachtelung von PKWs, einschließlich gebührenpflichtiger und nicht gebührenpflichtiger Straßen, hinzugefügt haben (Bild 4-20). Der Vorteil der verschachtelten Struktur besteht darin, dass die Reisenden zwischen zwei Autooptionen wählen können, wenn sie sich für das Autofahren entscheiden. Die Koeffizienten für die Nutzenberechnung für die beiden Autooptionen bleiben gleich. Der Verschachtelungskoeffizient für die Autoschachtelung wird gemäß den bisherigen Erfahrungen auf 0,25 gesetzt. Darüber hinaus wurde das Modell so kalibriert, dass es dem Status quo entspricht. Zu diesem Zweck wird angenommen, dass der Gesamtanteil der Kraftfahrzeuge dem Basisszenario entspricht, wenn die Mautkosten 0€ pro Kilometer betragen.

Nach der Kalibrierung entspricht der PKW-Anteil nahezu dem Basisszenario.

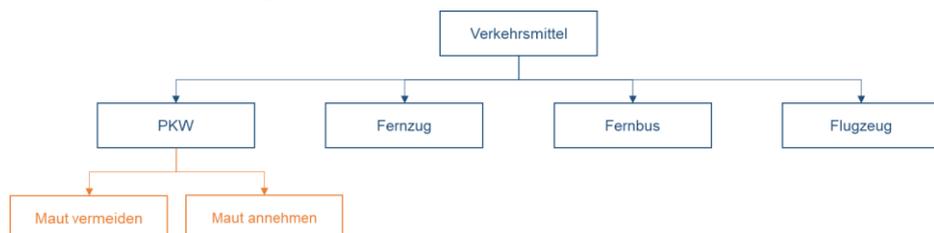


Bild 4-20. Struktur des Verkehrsmittelwahlmodells mit PKT Maut Vermeiden und PKW Maut Annehmen

### Sensitivitätsanalyse

Wir haben die beiden alternativen Mautsysteme (Autobahnen sowie Autobahnen plus Bundesstraßen) sowie zwei verschiedene Mautpreise getestet. Wir haben festgestellt, dass die Reisenden eher auf den Mautpreis als auf die angewandte Mautfläche reagieren. In den Szenarien 4\_A\_1 und 4\_B\_1 beträgt die Veränderung des PKW-Anteils -0,31% und -0,38%, was keinen großen Unterschied darstellt. Wenn jedoch der Preis von 0,015€/km auf 0,050€/km steigt, beträgt der Rückgang 1,56% in 4\_A\_1 und 1,64% in 4\_B\_1. Dennoch ist der Rückgang des PKW-Anteils im Vergleich zu den anderen Szenarien sehr gering.

Da der voraussichtliche Mautpreis nahe bei 0,015€/km liegen würde, haben wir die Szenarien 4\_A\_1 und 4\_B\_1 für die weitere Analyse ausgewählt.

Szenario	Variante	Modal Split (%)				Diff. zum Basisszenario (%P)
		Flugzeug	PKW	Fernbus	Fernzug	
Basis	-	6,77	77,60	3,56	12,07	-
4_A_1	Autobahnen (0,015€/km)	6,96	77,29	3,56	12,20	-0,31
4_A_2	Autobahnen (0,050€/km)	7,28	76,04	3,72	12,95	-1,56
4_B_1	Autobahnen und Bundesstraßen (0,015€/km)	6,89	77,22	3,60	12,29	-0,38
4_B_2	Autobahnen und Bundesstraßen (0,050€/km)	7,26	75,96	3,71	13,06	-1,64

Tabelle 4-36. Szenario 4 Sensitivitätsanalyse Modal Split

### Indikatoren

Die Erhebung von Mautgebühren verbessert die Erreichbarkeit der mautpflichtigen Straßen, da sich die Reisezeiten durch die Umleitung des Verkehrs auf nicht mautpflichtige Straßen verbessern (Tabelle 4-37). Im Einzelnen erhöhte sich durch die Maut auf Autobahnen die durchschnittliche Erreichbarkeit von Kernstädten um 4,7 Prozentpunkte und von ländlichen Gemeinden um 0,5

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Prozentpunkte. Ähnliche Werte ergeben sich, wenn die Maut auch auf Bundesstraßen angewandt wird. Der Nutzen ist in den Kernstädten größer, da dort die Verkehrsüberlastung aufgrund der Verkehrsstärken bei der Ein- und Ausfahrt in die bzw. aus der Stadt höher ist. Im Gegensatz dazu verringert sich die Erreichbarkeit für Reisende, die Mautgebühren vermeiden: rund 17 Prozentpunkte für alle Raumtypen in Szenario 4\_A\_1 und von -38,4 bis -42,4 Prozentpunkte in Szenario 4\_B\_1. In diesem Fall können wir feststellen, dass die Erhebung von Mautgebühren auf Autobahnen die Erreichbarkeit aufgrund der großen Umwege zur Mautvermeidung deutlich verringert. Die Umwege sind in ländlichen Gemeinden, in denen das Netz weniger Ausweichmöglichkeiten bietet, im Allgemeinen größer als in städtischen Gemeinden, was zu einer stärkeren Verringerung der Erreichbarkeit im Vergleich zu Kernstädten führt.

PKW Erreichbarkeit	Gemeindetyp	Basis	4_A_1		4_B_1		4_A_1		4_B_1	
			Maut vermeiden		Maut annehmen		Maut vermeiden		Maut annehmen	
			Wert	Diff. zum Basis-szenario (%P)	Wert	Diff. zum Basis-szenario (%P)	Wert	Diff. zum Basis-szenario (%P)	Wert	Diff. zum Basis-szenario (%P)
<b>Durchschnitt (%)</b>	Kern- und Großstädte	80,0	62,7	-17,3	84,7	4,7	41,6	-38,4	84,5	4,5
	Mittelstädte	81,7	63,7	-18,0	83,6	1,9	41,1	-40,6	83,5	1,8
	Kleinstädte	79,6	61,9	-17,7	80,9	1,3	38,5	-41,1	80,8	1,2
	Ländliche Gemeinden	77,4	59,8	-17,6	77,9	0,5	35,6	-41,8	77,9	0,5
<b>Maximale (%)</b>	Kern- und Großstädte	99,8	78,9	-20,9	101,8	2,0	53,0	-46,8	101,5	1,7
	Mittelstädte	99,2	79,8	-19,4	100,3	1,1	53,9	-45,3	100,2	1,0
	Kleinstädte	99,9	80,6	-19,3	101,0	1,1	54,5	-45,4	100,7	0,8
	Ländliche Gemeinden	100,0	80,6	-19,4	100,9	0,9	54,6	-45,4	100,8	0,8

Tabelle 4-37. Szenario 4 – PKW Erreichbarkeit

Obwohl die Erreichbarkeit mit dem PKW unter Umgehung der Maut stark zurückgegangen ist, führt die Einführung der Maut nicht zu größeren Veränderungen bei den Verkehrsanteilen im Fernverkehr (Tabelle 4-38). Es ist lediglich ein Rückgang des PKW-Anteils um 0,31 Prozentpunkte für die Maut auf Autobahnen und um 0,38 Prozentpunkte für die Maut auf Autobahnen und Bundesstraßen zu beobachten. Die Reisenden steigen vom PKW auf den Schienenfernverkehr und das Flugzeug um. Diese geringe Auswirkung auf den Anteil der Verkehrsträger könnte auf die geringen Kosten der Maut pro Kilometer zurückzuführen sein. Für eine Strecke von 500 km würde ein Nutzer, der auf gebührenpflichtigen Autobahnen unterwegs ist, 7, € an Mautgebühren und 4 € an Betriebskosten zahlen, was Gesamtkosten von 47,5€ bedeutet. Für dieselbe Strecke würden sich die Kosten für den Schienenfernverkehr auf 80,7€ belaufen. Auch wenn eine Maut erhoben wird, sind die Kosten

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

für die Autofahrt also immer noch viel niedriger als die Kosten für den Fernverkehr mit der Bahn. Betrachtet man speziell den inländischen Landverkehr, so ist der Rückgang des Autoanteils geringer, nämlich -0,13% für 4\_A\_1 und -0,27% für 4\_B\_1. Nichtsdestotrotz verlagert sich die Mehrheit der bisherigen Autoreisenden auf den Schienenfernverkehr (0,15% bzw. 0,22% Anstieg).

Ziel Typ	Verkehrsmittel	Basis(%)	4_A_1		4_B_1	
			Wert(%)	Diff. zum Basisszenario (%P)	Wert(%)	Diff. zum Basisszenario (%P)
Inland und Ausland	PKW	77,60	77,29	-0,31	77,22	-0,38
	-Maut annehmen	-	46,83	-	56,83	-
	-Maut vermeiden	77,60	30,44	-	20,39	-
	Fernzug	12,07	12,20	0,13	12,29	0,22
	Fernbus	3,56	3,56	0,00	3,60	0,04
	Flugzeug	6,77	6,96	0,19	6,89	0,12
Inland*	PKW	83,64	83,48	-0,13	83,34	-0,27
	Fernzug	13,05	13,20	0,15	13,27	0,22
	Fernbus	3,34	3,32	-0,02	3,39	0,05

\*Inländische Fahrten und der Anteil des Landverkehrs wurden zum Vergleich mit dem aggregierten Modell neu berechnet.

Tabelle 4-38. Szenario 4 – Modal Split

Obwohl sich der Modalsplit nicht wesentlich ändert, kommt es zu einer Verlagerung einer relativ großen Anzahl von Fahrten von mautpflichtigen Straßen auf freie Straßen (Tabelle 4-39). Das Szenario 4\_A\_1, bei dem davon ausgegangen wird, dass nur die Autobahnen mautpflichtig sind, führt zu einer erheblichen Verringerung von mehr als 115,4 Mio. km/Tag, was einer Verringerung um 30% entspricht, mit der Folge einer Überlastung des übrigen Netzes. Dies gilt insbesondere für die Bundeslandstraßen mit einer Zunahme der gefahrenen Fahrzeugkilometer um 126,6 Mio. km/Tag. Insgesamt ergibt sich eine Zunahme von 3,7 Mio. km/Tag im gesamten Netz, hauptsächlich verursacht durch die Umwege zur Vermeidung der Maut. Wenn die Maut auf das gesamte Bundesstraßennetz ausgedehnt wird, gehen sowohl auf den Autobahnen als auch auf den Bundes- und Landstraßen die gefahrenen Fahrzeugkilometer zurück, was zu einer Verlagerung auf das übrige Netz führt. Die Gesamtfahrleistung sinkt jedoch um 3,6 Mio. km/Tag aufgrund der Verlagerung auf den Schienenfernverkehr. Derselbe Trend kann anhand der durchschnittlichen Verspätung gemessen werden: Das Szenario 4\_A\_1 würde die Verspätung auf den Autobahnen (für diejenigen, die die Maut akzeptieren) geringfügig verringern, aber zusätzliche durchschnittliche Verspätungen (93% höher) auf den Bundeslandstraßen verursachen.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Verkehrsbezogene Indikatoren	Straßentyp	Basis	4_A_1		4_B_1	
			Wert	Diff. (%)	Wert	Diff. (%)
Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.5 V/C-Auslastung	Autobahnen	20,3	13,7	-6,6%P	16,6	-3,7%P
	Bundesstraßen	3,1	2,8	-0,3%P	2,6	-0,5%P
	Sonstige	1,1	1,4	0,3%P	1,4	0,3%P
Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.75 V/C-Auslastung	Autobahnen	3,8	1,9	-1,9%P	2,1	-1,7%P
	Bundesstraßen	0,3	0,4	0,1%P	0,3	0,0%P
	Sonstige	0,4	0,5	0,1%P	0,5	0,1%P
Fahrtleistung des Fernverkehrs (Mio. km/Tag)	Autobahnen	370,2	254,8	-31,2%	305,9	-17,4%
	Bundesstraßen	64,9	126,6	95,1%	51,8	-20,2%
	Sonstige	184,8	231,6	25,3%	265,8	43,8%
Durchschnitt Verlustzeiten im Verkehr durch Stauaufkommen (min)	Autobahnen	8,7	7,5	-14,1%	8,1	-7,1%
	Bundesstraßen	2,3	4,5	93,0%	2,1	-10,3%
	Sonstige	8,2	13,1	60,3%	15,5	89,8%

Tabelle 4-39. Szenario 4 – Verkehrsbezogene Indikatoren

Die erhebliche Verringerung der gefahrenen Fahrzeugkilometer auf mautpflichtigen Autobahnen führte zu einer Verringerung sowohl der Schallbelastung als auch der Verkehrsemissionen, die fast 11,70 Tausend Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen ausmachten (Tabelle 4-40). Die Verlagerung des Verkehrs von den Autobahnen auf freie Straßen führte jedoch zu einem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Bundes- und anderen Straßen um 31,2%. Wenn sowohl Autobahnen als auch Bundesstraßen mautpflichtig sind, sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf mautpflichtigen Straßen um 17,30%, während sie auf anderen Straßen um 20,23% ansteigen. Infolgedessen steigen die Gesamtemissionen geringfügig um 1,29% in Szenario 4\_A\_1 und 4,23% Tausend Tonnen in Szenario 4\_B\_1. Der Gesamtanstieg ist auf längere Umwege zur Vermeidung von Mautgebühren zurückzuführen.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Umweltbezogene Indikatoren	Gruppe	Basis	4_A_1		4_B_1	
			Wert	Diff. (%)	Wert	Diff. (%)
Schallemissionspegel:	Autobahnen	91,58	91,63	0,05%P	91,60	0,02%P
Anteil der Straßenlänge von mehr als 80 dB(A) (%)	Bundesstraßen	61,81	71,18	9,37%P	59,95	-1,86%P
	Sonstige	16,85	18,08	1,23%P	18,84	1,99%P
Schallemissionspegel:	Autobahnen	86,59	86,07	-0,60%	86,32	-0,31%
Spitzenstunde (Mittelwert) in dB(A)	Bundesstraßen	69,72	74,34	6,62%	68,93	-1,14%
	Sonstige	37,09	38,27	3,18%	39,86	7,48%
CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Tag (Tausend t)	Autobahnen	37,51	25,81	-31,20%	30,98	-17,39%
	Bundesstraßen	6,98	13,62	95,06%	5,57	-20,23%
	Sonstige	21,39	27,30	27,61%	32,12	50,15%
CO-Emissionen pro Tag (t)	Autobahnen	41,67	28,71	-31,10%	34,45	-17,32%
	Bundesstraßen	13,85	27,04	95,24%	11,05	-20,23%
	Sonstige	27,16	35,91	32,24%	42,57	56,77%
HC-Emissionen pro Tag (t)	Autobahnen	2,56	1,76	-31,17%	2,11	-17,37%
	Bundesstraßen	0,62	1,21	95,08%	0,50	-20,23%
	Sonstige	1,67	2,20	31,67%	2,63	57,06%
NO <sub>x</sub> -Emissionen pro Tag (t)	Autobahnen	83,42	57,40	-31,19%	68,92	-17,38%
	Bundesstraßen	18,04	35,19	95,09%	14,39	-20,22%
	Sonstige	49,13	63,30	28,84%	74,43	51,48%
Feinstaub pro Tag (t)	Autobahnen	0,86	0,59	-31,18%	0,71	-17,37%
	Bundesstraßen	0,18	0,35	95,07%	0,14	-20,23%
	Sonstige	0,51	0,66	28,54%	0,77	51,06%

Tabelle 4-40. Szenario 4 – Umweltbezogene Indikatoren

Tabelle 4-41 fasst die Veränderungen der CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen infolge der Einführung von Mautszenarien zusammen. In beiden Fällen führt die Maut Einführung zu einem Anstieg der Emissionen. Auch wenn einige Reisende vom PKW auf nachhaltigere Verkehrsträger umsteigen, kompensiert der Anstieg der gefahrenen Fahrzeugkilometer aufgrund von Umwegen die eingesparten Emissionen. Die Anwendung der Maut auf Autobahnen führt zu einem Anstieg der gesamten CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen um 1,21%, und wenn die Maut auf Bundesstraßen ausgedehnt wird, beläuft sich der Gesamtanstieg auf 2,86%.

Verkehrsmittel	Basis	4_A_1		4_B_1	
		Wert	Diff. zum Basis-szenario (%)	Wert	Diff. zum Basis-szenario (%)
Flugzeug	51.477,91	52.000,66	1,02	51.139,27	-0,65
PKW	172.396,10	172.817,46	0,24	177.460,78	2,94
Fernbus	1.288,55	2.140,98	66,15	2.151,647	66,98
Fernzug	4.726,18	5.701,07	20,63	5.706,078	20,73
Gesamt	229.888,73	232.660,16	1,21	236.457,78	2,86

Tabelle 4-41. Szenario 4 – CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen

Tabelle 4-42 zeigt die Ergebnisse der allgemeinen Reisekosten in Abhängigkeit vom Einkommen. Die Einführung der Maut erhöht die allgemeinen Reisekosten in beiden Szenarien für alle Einkommensgruppen aufgrund der Mautzahlung und der längeren Reisezeiten für die Autofahrer, die die Maut vermeiden. Darüber hinaus können Reisende, die auf andere Verkehrsträger ausweichen, langsamer und auch mit höheren Kosten reisen als Autofahrer. Die sozioökonomische

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Gruppe, die am stärksten betroffen ist, ist die Gruppe der Geringverdiener, bei der der Anstieg fast dreimal so hoch ist wie bei der Gruppe der Geringverdiener und fünfmal so hoch wie bei der Gruppe der Hochverdiener. Die Unterschiede verschärfen sich beim Szenario 4\_B\_1 für alle Einkommensgruppen mit Ausnahme der Gruppe mit sehr hohem sozioökonomischem Status. Diese Reisenden sind weniger betroffen als andere, wenn die Maut auch auf Bundesstraßen erhoben wird, da sie bereits auf mautpflichtigen Autobahnen unterwegs wären. Bei den anderen sozioökonomischen Gruppen führt die Ausweitung des Netzes mit Mautgebühren zu einem Anstieg des Verhältnisses.

Ökonomischer Status des Haushalts	Basis	4_A_1	Diff. zum Basis-szenario (%)	4_B_1	Diff. zum Basis-szenario (%)
		Wert		Wert	
sehr hoch	4,84	5,18	0,34	5,20	0,36
hoch	9,00	9,44	0,44	9,82	0,82
mittel	12,38	12,92	0,54	13,35	0,97
niedrig	16,93	17,60	0,67	18,21	1,28
sehr niedrig	26,61	28,19	1,58	28,71	2,10

Tabelle 4.42. Szenario 4 - Belastung der Haushalte durch Bepreisung nach Einkommensgruppen

## 2942.0.0. Aggregiertes Modell

Im aggregierten Modell wird die Simulationssoftware SUMO eingesetzt und 100% der Nachfrage simuliert. Daher wäre es möglich alle Trajektorien der verschiedenen Fahrzeuge zu extrahieren und analysieren. Die Dimensionen der Ausgabedatei wäre allerdings enorm hoch und daher nicht mehr handhabbar. Aus diesem Grund wurde in diesem Modell auf eine Differenzierung verzichtet und beschlossen, dass nur die Varianten des Szenarios der Einführung einer Maut betrachtet werden, die auf allen Straßentypen des Fernstraßennetzes angewendet wird. Da im aggregierten Modell ohnehin nur Fernstraßen im Netzwerk vorhanden sind, können die Kosten der Maut zu den bestehenden Kosten für die Nutzung des PKW addiert werden. In der erneuten Berechnung der Verkehrsmittelwahl wird dann basierend auf diesen Kosten entschieden.

Im aggregierten Modell wird für das Szenario der Einführung einer entfernungsabhängigen Maut nicht unterschieden auf welchen Straßentyp sich ein Fahrzeug befindet. Hier wird die Maut sowohl für die Fahrten auf Autobahnen als auch für die Fahrten auf Bundesstraßen erhoben.

Szenario	Variante	Modal Split			Diff. zum Basisszenario		
		PKW	Fernbus	Fernzug	PKW	Fernbus	Fernzug
Basis	-	85,34%	2,93%	11,73%	-	-	-
4_B_1	Autobahnen und Bundesstraßen (0,015€/km)	84,22%	3,21%	12,57%	-1,12%P	0,28%P	0,84%P
4_B_2	Autobahnen und Bundesstraßen (0,050€/km)	82,86%	3,82%	13,32%	-2,48%P	0,89%P	1,59%P

Tabelle 4-43. Szenario 4 des aggregierten Modells – Modal Split

Es zeigt sich, dass durch die Einführung einer Maut eine Veränderung der Modalwahl weg vom privaten PKW hin zu öffentlichen Verkehrsmitteln beobachtet werden kann. Die Änderungen sind durch die geringen angenommenen Preise der Maut allerdings nicht sehr hoch. In Tabelle 4-44 sind die Ergebnisse des Szenarios 4\_B\_1 nach der Umlegung mit der SUMO Verkehrssimulation dargestellt. Bei einem Preis von 0,05€/km ergibt sich demnach eine Reduktion des Anteils des PKW im Verkehrsmittelmix um 1,8%-Punkte.

Indikator	Basis	4_B_1	
		Wert	Diff. zum Basisszenario
Modal Split - PKW	85,34%	83,50%	-1,84%P
Modal Split - Fernbus	2,93%	3,17%	0,24%P
Modal Split - Fernzug	11,73%	13,33%	1,60%P
Fahrleistung [Mio. km]	690,64	677,88	-1,85%
CO <sub>2</sub> -äquivalente [Tsd. t/Tag]	111,10	109,73	-1,23%

Tabelle 4-44. Szenario 4 – Indikatoren

## 3019.0. Szenario 5

### 3020.0.0. Agentenbasiertes Modell

#### Eingabedaten

Das Szenario 5 ist als eine Kombination der Szenarien 1, 2 und 3 konzipiert. Daher werden die folgenden Datenquellen verwendet:

- **Busreisevariablen:** Die für Szenario 2 modifizierten Reisezeitmatrizen werden direkt verwendet.
- **Bahnreisevariablen:** Wenn der Zugang zur Bahn zu Fuß erfolgt, werden die Matrizen von Szenario 3 verwendet, die bereits geändert wurden, um ein verbessertes Bahnangebot darzustellen. Wenn der Zubringerverkehrsmittel ein Ridopooling ist, werden die für Szenario

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

1 erstellten Matrizen nach dem gleichen Verfahren wie für Szenario 3 verbessert. Das Ergebnis der Bahnreisezeiten ist in der Bild 4-21 zusammengefasst.

- Für dieses Szenario wurde das verschachtelte Logit-Mode-Choice-Modell angewandt (Bild 4-9) und der gleiche Kalibrierungsfaktor wie in Szenario 1 verwendet.

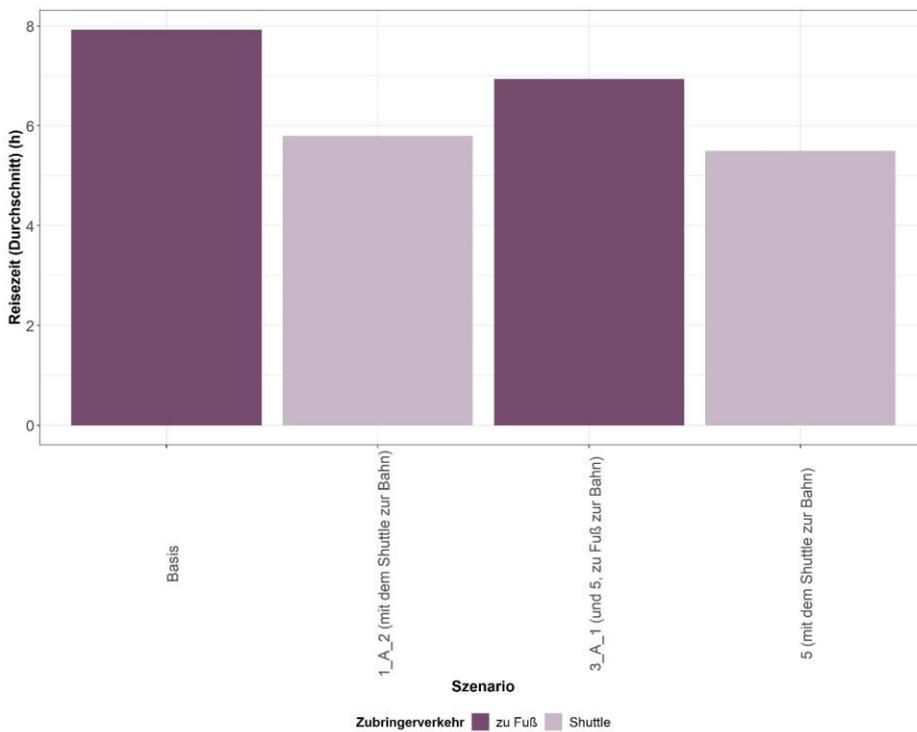


Bild 4-21. Vergleich der Zugreisezeiten zwischen dem Basisszenario und dem kombinierten Szenario 5 (1% der Start-/Zielpaare)

### Indikatoren

Die Erreichbarkeit mit dem Bus wird im Vergleich zu Szenario 2 nicht verbessert, daher werden nur Änderungen bei der Erreichbarkeit mit der Bahn dargestellt. Für Verbesserungen der Buszugänglichkeit siehe Tabelle 4-18. Tabelle 4-45 zeigt die Verbesserungen der Zugänglichkeit für Szenario 5. Ähnlich wie bei den Szenarien 1 und 3 profitieren die ländlichen Gemeinden am meisten von dieser Maßnahme. Die durchschnittliche Erreichbarkeit mit der Bahn wird in den

Kernstädten um 11,2 Prozentpunkte und in den ländlichen Gemeinden um 11,6 Prozentpunkte verbessert. Der maximale Erreichbarkeitswert stieg zwischen 9,4 Prozentpunkten in Kernstädten und 12,3 Prozentpunkten in mittelgroßen Städten.

Erreichbarkeit	Gemeindetyp	Basis	5	
			Wert	Diff. zum Basisszenario (%P)
<b>Durchschnitt (%)</b>	Kern- und Großstädte	52,8	64,0	11,2
	Mittelstädte	46,4	55,9	9,5
	Kleinstädte	40,2	52,4	12,2
	Ländliche Gemeinden	37,1	48,7	11,6
<b>Maximale (%)</b>	Kern- und Großstädte	72,4	81,8	9,4
	Mittelstädte	66,9	79,2	12,3
	Kleinstädte	64,8	78,1	13,3
	Ländliche Gemeinden	65,6	77,4	11,8

Tabelle 4-45. Szenario 5 – Erreichbarkeit

Die Tabelle 4-46 zeigt die verkehrlichen Auswirkungen von Szenario 5, das alle Maßnahmen im Zusammenhang mit Erweiterungen oder Verbesserungen der öffentlichen Verkehrsdienste kombiniert. Wie erwartet, sind die Ergebnisse des Szenarios 5 ähnlich wie die Kombination der Szenarien 1\_A\_2, 2\_A\_3 und 3\_A\_1. Dies führt zu einem Anstieg der Bahnnachfrage um fast 2,95 Prozentpunkte (die Dienste sind etwas schneller und können mit Ridepooling-Diensten auf Abruf genutzt werden). Die Busfahrgastzahlen werden nicht erhöht, da die Verbesserungen des Schienennetzes relevanter sind, so dass die Verbesserungen des Busnetzes angesichts der Annahmen des Modells und der Schätzungen zur Verkehrsmittelwahl nicht wettbewerbsfähig genug sind. Die meisten Fahrgäste werden vom PKW verlagert, wodurch dessen Anteil um 3,27 Prozentpunkte sinkt. Die Ergebnisse sind sehr ähnlich, wenn nur Inlandsreisen mit dem Landverkehr betrachtet werden.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Ziel-Typ	Verkehrsmittel	Basis(%)	5	
			Wert (%)	Diff. zum Basis-szenario (%P)
Inland und Ausland	PKW	77,60	74,33	-3,27
	Fernzug	12,07	15,02	2,95
	Fernbus	3,56	3,47	-0,09
	Flugzeug	6,77	7,18	0,41
Inland*	PKW	83,61	80,39	-3,22
	Fernzug	13,05	16,33	3,28
	Fernbus	3,34	3,28	-0,06

\*Inländische Fahrten und der Anteil des Landverkehrs wurden zum Vergleich mit dem aggregierten Modell neu berechnet.

Tabelle 4-46. Szenario 5 – Modal Split

Die Auswirkungen all dieser Maßnahmen auf das Straßennetz sind relevant (Tabelle 4-47). Sie lassen sich durch eine Verringerung der Staus (vor allem auf den Autobahnen, da die Straßen niedrigerer Kategorien auch durch Pendelfahrten belastet werden, die kürzer sind als Autofahrten und daher die Autobahnen weniger beanspruchen) und durch eine Verringerung der gefahrenen Fahrzeugkilometer und der Verspätungen (wiederum stärker auf den Autobahnen) bestätigen.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Verkehrsbezogene Indikatoren	Straßentyp	Basis	Szenario 5	
			Wert	Diff. zum Basisszenario
<b>Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.5 V/C Auslastung (%)</b>	Autobahnen	20,3	20,8	0,5%P
	Bundesstraßen	3,1	3,4	0,3%P
	Sonstige	1,1	1,1	0,0%P
<b>Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.75 V/C Auslastung (%)</b>	Autobahnen	3,8	3,3	-0,5%P
	Bundesstraßen	0,3	0,4	0,1%P
	Sonstige	0,4	0,4	0,0%P
<b>Fahrtleistung des Fernverkehrs (Mio. km/Tag)</b>	Autobahnen	370,2	358,4	-3,2%
	Bundesstraßen	64,9	65,2	0,4%
	Sonstige	184,8	189,2	2,4%
<b>Durchschnitt Verlustzeiten im Verkehr durch Stauaufkommen (%)</b>	Autobahnen	8,7	8,2	-5,6%
	Bundesstraßen	2,3	2,2	-4,4%
	Sonstige	8,2	8,0	-1,7%

Tabelle 4-47. Szenario 5 — Verkehrsbezogene Indikatoren

Was die Umweltindikatoren betrifft, so bleibt die Länge des Netzes mit Schallemissionspegel über 80 dB(A) praktisch konstant (Tabelle 4-48). Auf den Autobahnen gibt es keine Veränderungen der Schallemissionspegel in der Spitzenstunde, auf den Bundesstraßen ist ein leichter Anstieg von 0,47% zu verzeichnen. Der Rückgang der Emissionspegel ist auf allen Straßentypen zu beobachten, was sich durch die Verlagerung vom PKW auf den Fernbus und die Bahn und die Verringerung der Fahrleistung erklären lässt. Dieser Trend zur Verringerung der Emissionen ist bei allen dargestellten Emissionen zu beobachten.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Umweltbezogene Indikatoren	Straßentyp	Basis	5	
			Wert	Diff. zum Basis-szenario
<b>Schallemissionspegel: Anteil der Straßenlänge von mehr als 80 dB(A) (%)</b>	Autobahnen	91,58	91,60	0,37%P
	Bundesstraßen	61,81	59,95	0,21%P
	Sonstige	16,85	18,84	0,11%P
<b>Schallemissionspegel: Spitzenstunde (Mittelwert) in dB(A)</b>	Autobahnen	86,59	86,59	0,00%
	Bundesstraßen	69,72	70,05	0,47%
	Sonstige	37,09	36,52	-1,55%
<b>CO<sub>2</sub> Emissionen pro Tag (Tausend t)</b>	Autobahnen	37,51	35,68	-4,87%
	Bundesstraßen	6,98	6,93	-0,81%
	Sonstige	21,39	20,73	-3,11%
<b>CO Emissionen pro Tag (t)</b>	Autobahnen	41,67	39,63	-4,89%
	Bundesstraßen	13,85	13,73	-0,85%
	Sonstige	27,16	26,54	-2,29%
<b>HC Emissionen pro Tag (t)</b>	Autobahnen	2,56	2,44	-4,86%
	Bundesstraßen	0,62	0,62	-0,82%
	Sonstige	1,67	1,63	-2,72%
<b>No<sub>x</sub> Emissionen pro Tag (t)</b>	Autobahnen	83,42	79,35	-4,88%
	Bundesstraßen	18,04	17,89	-0,82%
	Sonstige	49,13	47,70	-2,91%
<b>Feinstaub pro Tag (t)</b>	Autobahnen	0,86	0,82	-4,87%
	Bundesstraßen	0,18	0,18	-0,81%
	Sonstige	0,51	0,50	-3,04%

Tabelle 4-48. Szenario 5 – Umweltbezogene Indikatoren

Eine Zusammenfassung der Veränderungen bei den CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen nach Umsetzung der Kombination der Szenarien 1, 2 und 3 ist in der Tabelle 4-49 dargestellt. Bei diesem Szenario liegt der Schwerpunkt auf der Verbesserung des Fernverkehrs mit Bus und Bahn. Bei diesem Szenario wurden die CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen der Verkehrsträger Luft und PKW um 3,08 bzw. 3,96 Prozent reduziert. Die Menge der von Bus und Bahn freigesetzten Emissionen stieg erwartungsgemäß an. Dennoch wurde die Gesamtmenge der Emissionen aller Fernverkehrsmittel um 1,18% reduziert.

Verkehrsmittel	Basis	Szenario 5	
		Wert	Diff. zum Basisszenario (%)
<b>Flugzeug</b>	51.477,91	49.893,4	-3,08
<b>PKW</b>	172.396,10	165.573,4	-3,96
<b>Fernbus</b>	1.288,55	2.022,4	56,95
<b>Fernzug</b>	4.726,18	9.726,2	105,79
<b>Gesamt</b>	229.888,73	227.215,4	-1,18

Tabelle 4-49. Szenario 5 – CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen

Schließlich reduzieren die Transitmaßnahmen für alle sozioökonomischen Statusgruppen die allgemeinen Reisekosten pro Einkommen (Tabelle 4-50). Die größte Differenz ergibt sich für die

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Gruppe mit niedrigem Einkommen, gefolgt von den Gruppen mit sehr niedrigem und mittlerem Einkommen. Bei den hohen und sehr hohen Einkommensgruppen sind die Veränderungen gering.

Ökonomischer Status des Haushalts	Basis	Szenario 5	
		Wert	Diff. zum Basis-szenario (%P)
sehr hoch	4.84	4.67	-0.17
hoch	9.00	8.89	-0.10
mittel	12.38	12.00	-0.38
niedrig	16.93	16.22	-0.70
sehr niedrig	26.61	26.22	-0.39

Tabelle 4-50. Szenario 5 - Belastung der Haushalte durch Bepreisung nach Einkommensgruppen

### 3395.0.0. — Aggregiertes Modell

Das Szenario 5, welches die drei Maßnahmen zur Steigerung der Attraktivität des öffentlichen Verkehrs kombiniert, kann den Modal Split weg von privaten PKW hin zum öffentlichen Verkehr steigern. Tabelle 4-51 beinhaltet die Ergebnisse des aggregierten Modells für dieses Szenario. Im Modell wurde jeweils eine Ausprägung der Szenarien 1, 2 und 3 gewählt und gemeinsam modelliert. Das bedeutet, dass sowohl ein Ridepooling-Service für die bessere Erreichbarkeit der Haltestellen der öffentlichen Verkehrsmittel eingeführt wurde, als auch die beiden Maßnahmen Senkung der Besteuerung des Fernbusverkehrs und höhere Geschwindigkeit des Fernbusverkehrs in bisher schlecht bedienten Strecken und auch die Annäherung des Deutschlandtakts über die Verbesserung der Reise- und Umsteigezeiten der Bahn gemeinsam im Modell umgesetzt wurden. Das Ergebnis im Hinblick auf den Modal Split zeigt, dass sich zwar der Anteil der Autofahrer verringert, jedoch in einem relativ geringen Maße. Zusätzlich verringert sich auch der Anteil der Fernbusreisenden zugunsten der Bahn. Offenbar sind die Verbesserungen im Bahnverkehr so gut, dass dadurch auch Bahnfahrende abgeworben werden würden.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Szenario	Variante	Modal Split			Diff. zum Basis-szenario		
		PKW	Fernbus	Fernzug	PKW	Fernbus	Fernzug
Basis		85,34%	2,93%	11,73%	-	-	-
5	1_A_2+ 2_A_3+ 3_A_1	82,72%	3,39%	13,89%	-2,62%P	0,46%P	2,16%P

Tabelle 4-51. Szenario 5 — Modal Split

Auch für dieses Szenario wurde nach der Sensitivitätsanalyse eine weitere Umlegung in SUMO gerechnet. Die Ergebnisse für die analysierten Indikatoren sind in Tabelle 4-52 wiedergegeben. Es wird ersichtlich, dass sich durch die Änderungen im Modal Split die Gesamtfahrleistung reduziert und auch die Emissionen gesenkt werden können.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Indikator	Basis	5	
		Wert	Diff. zum Basisszenario
Modal Split – PKW	85,34%	82,50%	-1,84%P
Modal Split – Fernbus	2,93%	3,17%	0,24%P
Modal Split – Fernzug	11,73%	13,33%	-1,60%P
Fahrleistung [Mio. km]	690,64	670,86	-2,86%
CO <sub>2</sub> -äquivalente [Tsd. t/Tag]	111,10	108,97	-1,92%

Tabelle 4-52. Szenario 5 – Indikatoren

## 3461.0. Szenario 6

### 3462.0.0. Agentenbasiertes Modell

#### Eingabedaten

Für das Szenario 6 werden die Einstellungen von Szenario 5 und die von Szenario 4 gemeinsam konfiguriert. Es werden keine neuen Eingabedaten erzeugt und das Modell wird nicht weiter verändert.

#### Integration in das Modell der Verkehrsmittelwahl

Dennoch erfordert dieses Szenario eine erneute Umstrukturierung des Verkehrsmittelwahlmodells, da wir die Szenarien 1 und 4 zusammen berücksichtigen müssen. Die Struktur des verschachtelten Verkehrsmittelwahlmodells ist in Bild 4-22 dargestellt. Aufgrund der neuen Struktur wurde das Modell auch neu kalibriert. Die Kalibrierungsmethode ist dieselbe wie bei Szenario 1 und 4, und die Annahmen aus diesen beiden Szenarien wurden bei der Modellkalibrierung gemeinsam berücksichtigt. Nach der Kalibrierung konnten wir den Anteil reproduzieren, der mit dem Basisszenario vergleichbar ist.

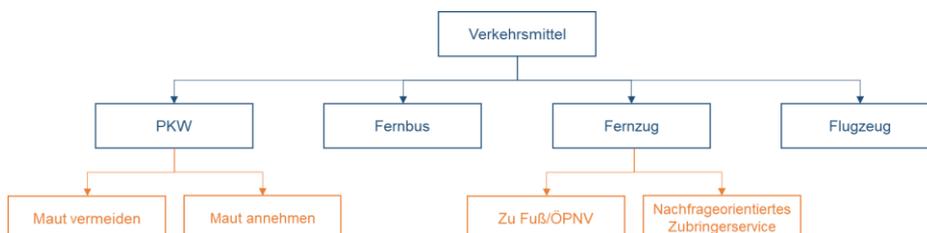


Bild 4-22. Struktur des Verkehrsmittelwahlmodells mit Zugang zu Fuß/ÖPNV, nachfrageorientiertem Zubringerservice, PKW Maut Vermeiden und PKW Maut Annahme

## Indikatoren

Das letzte Szenario 6 ist das Ergebnis der Umsetzung aller Maßnahmen im öffentlichen Verkehr (wie in Szenario 5 definiert – Pull-Maßnahmen) und der Maut auf dem gesamten Bundesstraßennetz (Push-Maßnahme). Die Auswirkungen auf den Modal Split sind in der Tabelle 4-53 dargestellt. Die Veränderungen im Modal Split sind etwas stärker als in Szenario 5. Die Einführung der Maut entmutigt die Nutzung des PKWs für Fernreisen und erhöht vor allem die Nutzung der Bahn (Busreisen nehmen leicht zu, Flugreisen gehen etwas zurück, da die Anfahrtsstrecken mit Mautgebühren belastet werden).

Ziel-Typ	Mode	Basis(%)	Szenario 6	
			Wert (%)	Diff. zum-Basisszenario (%P)
Inland und Ausland	PKW	77,60	74,00	-3,60
	–Maut annehmen	-	54,38	-
	–Maut vermeiden	77,60	19,63	-
	Fernzug	12,07	15,73	3,66
	Fernbus	3,56	3,51	0,05
	Flugzeug	6,77	6,75	-0,02
Inland*	PKW	83,61	79,74	-3,87
	Fernzug	13,05	16,97	3,92
	Fernbus	3,34	3,28	-0,06

\*Inländische Fahrten und der Anteil des Landverkehrs wurden zum Vergleich mit dem aggregierten Modell neu berechnet.

Tabelle 4-53. Szenario 6 – Modal Split

Durch die Einführung der Maut kommt es zu einer Verlagerung des Straßenverkehrs von den Bundesstraßen auf das übrige Netz (Tabelle 4-54). Dies zeigt sich in einer Verringerung der Staus (stärker auf den Autobahnen, aber auch auf den Bundes- und Landstraßen) bei gleichzeitiger Zunahme der Staus auf den Straßen der unteren Kategorien. Dieselben Ergebnisse lassen sich bei den Indikatoren zurückgelegte Fahrzeugkilometer und Verspätung beobachten.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Verkehrsbezogene Indikatoren	Straßentyp	Basis	Szenario 6	
			Wert	Diff. zum Basisszenario
<b>Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.5 V/C Auslastung (%)</b>	Autobahnen	20,3	14,3	-6,1%P
	Bundesstraßen	3,1	2,8	-0,3%P
	Sonstige	1,1	1,4	0,4%P
<b>Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.75 V/C Auslastung (%)</b>	Autobahnen	3,8	1,8	-2,0%P
	Bundesstraßen	0,3	0,4	0,0%P
	Sonstige	0,4	0,5	0,1%P
<b>Fahrtleistung des Fernverkehrs (Mio. km/Tag)</b>	Autobahnen	370,2	291,9	-21,2%
	Bundesstraßen	64,9	52,9	-18,4%
	Sonstige	184,8	263,4	42,5%
<b>Durchschnitt-Verlustzeiten im Verkehr durch Stauaufkommen (%)</b>	Autobahnen	8,7	7,5	-13,7%
	Bundesstraßen	2,3	2,0	-15,1%
	Sonstige	8,2	14,3	75,2%

Tabelle 4-54. Szenario 6 – Verkehrsbezogene Indikatoren

Bei den Umweltindikatoren (Tabelle 4-55) konnten wir nur geringfügige Veränderungen beim Schall an anderen Straßen feststellen. Wir haben einen leichten Anstieg des Prozentsatzes der anderen Straßen, die 80 dB(A) überschreiten, von 16,85% auf 18,60% festgestellt. Die Verringerung der Verkehrsstärken auf Bundesstraßen führt jedoch nicht zu einer Verringerung des Prozentsatzes der Straßen, die 80 dB(A) überschreiten, da der durchschnittliche Schallemissionspegel viel höher ist als 80 dB(A): 86,10 dB(A) für Autobahnen. Für diese hohen Werte konnten wir einen leichten Rückgang feststellen. Ebenso ist eine Verlagerung der Emissionen von Autobahnen und Bundesstraßen auf andere Straßentypen zu beobachten. Die Emissionen zeigen einen ähnlichen Trend wie die Fahrtleistung des Fernverkehrs. Die Emissionen wurden auf Autobahnen um 21% reduziert und auf anderen Straßen um 48% – 55% erhöht.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Umweltbezogene Indikatoren	Straßentyp	Basis	Szenario-6	
			Wert	Diff. zum Basisszenario
<b>Schallemissionspegel: Anteil der Straßenlänge von mehr als 80 dB(A) (%)</b>	Autobahnen	91,58	91,47	-0,11%P
	Bundesstraßen	61,81	60,67	-1,14%P
	Sonstige	16,85	18,60	1,75%P
<b>Schallemissionspegel: Spitzenstunde (Mittelwert) in dB(A)</b>	Autobahnen	86,59	86,10	-0,57%
	Bundesstraßen	69,72	69,30	-0,60%
	Sonstige	37,09	39,27	5,87%
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Tag (Tausend t)</b>	Autobahnen	37,51	29,56	-21,19%
	Bundesstraßen	6,98	5,70	-18,34%
	Sonstige	21,39	31,81	48,71%
<b>CO-Emissionen pro Tag (t)</b>	Autobahnen	41,67	32,88	-21,09%
	Bundesstraßen	13,85	11,29	-18,48%
	Sonstige	27,16	42,11	55,04%
<b>HC-Emissionen pro Tag (t)</b>	Autobahnen	2,56	2,02	-21,09%
	Bundesstraßen	0,62	0,51	-17,74%
	Sonstige	1,67	2,60	55,69%
<b>NO<sub>x</sub>-Emissionen pro Tag (t)</b>	Autobahnen	83,42	65,75	-21,18%
	Bundesstraßen	18,04	14,71	-18,46%
	Sonstige	49,13	73,70	50,01%
<b>Feinstaub pro Tag (t)</b>	Autobahnen	0,86	0,68	-20,93%
	Bundesstraßen	0,18	0,15	-16,67%
	Sonstige	0,51	0,77	50,98%

Tabelle 4-55. Szenario-6 – Umweltbezogene Indikatoren

Die Auswirkungen der Kombination aller Szenarien auf die CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen sind in der Tabelle 4-56 dargestellt. Es ist zu beobachten, dass die CO<sub>2</sub>-äq-Emissionen des PKWs sinken und die CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen aller anderen Verkehrsträger aufgrund der Verkehrsverlagerung vom PKW auf andere Verkehrsträger steigen. Der höchste Anstieg ist mit 125% für den Bahnverkehr zu verzeichnen. Obwohl wir eine Verringerung der Autoemissionen haben, steigen die Gesamtemissionen 1,29%. Dies ist auf die zusätzlichen Zu- und Abgänge zum Fernverkehr zurückzuführen, die mehr Emissionen verursachen als Zu- und Abgänge zu Fuß oder mit dem ÖPNV, sowie auf die Zunahme der Fluggäste. Maßnahmen zur Verringerung des Flugverkehrs könnten dazu beitragen, die Zahl der Passagiere, die vom PKW auf das Flugzeug verlagert werden, zu begrenzen.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Verkehrsmittel	Basis	Szenario 6	
		Wert	Diff. zum Basisszenario (%)
Flugzeug	51.477,94	50.491,30	-1,92
PKW	172.396,10	169.652,44	-1,59
Fernbus	1.288,55	2.087,46	62,00
Fernzug	4.726,18	10.633,78	125,00
<b>Gesamt</b>	<b>229.888,73</b>	<b>232.864,99</b>	<b>1,29</b>

Tabelle 4-56. Szenario 6 – CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen

Die Kombination aller Szenarien erhöht die allgemeinen Reisekosten pro Einkommen über alle sozioökonomischen Status hinweg (Tabelle 4-57). Einerseits leiden Reisende, die sich für der PKW entscheiden, unter höheren allgemeinen Kosten, da sie Mautgebühren zahlen und/oder längere Strecken zurücklegen müssen, um die Maut zu umgehen. Andererseits wechseln Reisende, die vom PKW auf die Schiene, den Bus oder das Flugzeug umsteigen, zu Verkehrsträgern, die nicht so schnell und auch teurer sind, so dass sich ihre allgemeinen Reisekosten im Vergleich zum Basisszenario erhöhen. Vergleicht man dieses Ergebnis mit den beiden Szenarien 4 und 5, so kann man feststellen, dass die Einführung von Pull-Maßnahmen, wie sie in Szenario 5 vorgeschlagen werden, das Verhältnis zwischen Kosten und Einkommen zwar verringern, das Verhältnis aber in jedem Fall höher ist als im Basisszenario. Dies deutet darauf hin, dass der treibende Faktor für das kombinierte Szenario die Push-Maßnahmen sind und die Pull-Maßnahmen dazu beitragen, die Auswirkungen auf die Wirtschaft der Haushalte abzumildern.

Ökonomischer Status des Haushalts	Basis	Szenario 6	
		Wert	Diff. zum Basisszenario (%P)
sehr hoch	4,84	5,25	0,41
hoch	9,00	9,81	0,81
mittel	12,38	13,31	0,93
niedrig	16,93	18,20	1,27
sehr niedrig	26,61	28,95	2,34

Tabelle 4-57. Szenario 6 – Belastung der Haushalte durch Bepreisung nach Einkommensgruppen

### 3793.0.0. – Aggregiertes Modell

Im Szenario 6 werden nun genau wie in Szenario 5 die drei Szenarien zur Förderung der Nutzung des öffentlichen Verkehrs kombiniert, als auch zusätzlich eine Maut für den privaten PKW-Verkehr eingeführt. In Tabelle 4-58 ist zu erkennen, dass sich auch in diesem Szenario der Modal Split weg vom privaten PKW hin zum öffentlichen Verkehr verändert. Die Änderungen fallen größer aus als im Szenario 5, allerdings nur geringfügig. Das liegt vermutlich daran, dass auch die Maßnahme entfernungsabhängige Maut des Szenarios 4 keine besonders großen Veränderungen im Modal

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Split ausmacht. Die Vorteile des Fahrens im privaten PKW wiegen offenbar auch bei einer Preissteigerung in diesem Maße noch immer schwerer.

Szenario	Variante	Modal Split			Diff. zum Basisszenario		
		PKW	Fernbus	Fernzug	PKW	Fernbus	Fernzug
Basis	-	85,3%	2,9%	11,7%	-	-	-
6	1_A_2+						
	2_A_3+	82,53%	3,42%	14,05%	-2,81%P	0,49%P	2,32%P
	3_A_1+						
	4_B_1						

Tabelle 4-58. Szenario 6 im aggregierten Modell – Modal Split

Die Ergebnisse der Indikatoren nach Auswertung der Simulationsergebnisse nach erneuter Verkehrsumlegung sind in Tabelle 4-59 dargestellt. Durch die Kombination der verschiedenen Maßnahmen kann eine Einsparung von ca. 22 Mio. Fahrzeugkilometern auf den Fernstraßen erreicht werden. Auch die verkehrsbedingten Emissionen können um über 2% reduziert werden.

Indikator	Basis	Szenario 6	
		Wert	Diff. zum Basisszenario
Modal Split – PKW	85,34%	82,23%	-3,11%P
Modal Split – Fernbus	2,93%	3,46%	0,53%P
Modal Split – Fernzug	11,73%	14,31%	2,58%P
Fahrleistung [Mio. km]	690,64	668,86	-3,16%
CO <sub>2</sub> -äquivalente [Tsd. t/Tag]	111,10	108,75	-2,12%

Tabelle 4-59. Szenario 6 im aggregierten Modell – Indikatoren

## 3860.0. Szenario 7

### 3861.0.0. Agentenbasiertes Modell

#### 4.8.1.2 Sensitivitätsanalyse

Wir haben die vier verschiedenen Kilometer-basierten Mautgebühren auf alle Autofahrten getestet, nämlich 0,20, 0,50, 1,00 und 2,00 €/km (Tabelle 4-60). In den Szenarien 7\_A\_1 und 7\_B\_1 beträgt die Veränderung des PKW-Anteils -3,84% und -13,43%. In 7\_C\_1 und 7\_D\_1 beträgt der Rückgang 26,52% und 43,02%. Diese Ergebnisse zeigt die Rückgang des PKW-Anteils im Vergleich zu den anderen Szenarien von PKW-Maut auf die Autobahnen und/oder Bundesstraßen sprunghaft unterschiedlich.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Szenario	Variante	Modal-Split (%)				Diff. zum Basisszenario (%P)
		Flugzeug	PKW	Fernbus	Fernzug	
Basis	-	6,77	77,60	3,56	12,07	-
7_A_1	Km-basierte Mautgebühr auf alle Autofahrten (0,20€/km)	7,35	73,76	4,18	14,71	-3,84
7_B_1	Km-basierte Mautgebühr auf alle Autofahrten (0,50€/km)	8,14	64,17	5,53	22,16	-13,43
7_C_1	Km-basierte Mautgebühr auf alle Autofahrten (1,00€/km)	8,56	51,01	7,46	32,97	-26,59
7_D_1	Km-basierte Mautgebühr auf alle Autofahrten (2,00€/km)	8,26	34,58	10,16	47,00	-43,02

Tabelle 4-60. Szenario 7 Sensitivitätsanalyse-Modal Split

#### 4.1.8.3 Indikatoren

Die PKW-Erreichbarkeit ist in Szenario 7 deutlich eingeschränkt (Tabelle 4-61). Der maximale Erreichbarkeitswert verringert zwischen 60,9 Prozentpunkten in Kernstädten und 62,6 Prozentpunkten in mittelgroßen Städten. Insbesondere sinkt die Erreichbarkeit ländlicher Gebiete auf 16,5, ähnlich wie bei der Fernbuserreichbarkeit. Obwohl die Reisezeiten immer noch schnell sind, hat der Anstieg der Kosten dazu geführt, dass die allgemeinen Reisezeiten denen des Fernbusses ähneln.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Erreichbarkeit	Gemeindetyp	Basis	7_C_1	
			Wert	Diff. zum Basisszenario (%P)
<b>Durchschnitt (%)</b>	Kern- und Großstädte	80,0	19,1	60,9
	Mittelstädte	81,7	19,1	62,6
	Kleinstädte	79,6	18,2	61,4
	Ländliche Gemeinden	77,4	16,5	60,9
<b>Maximale (%)</b>	Kern- und Großstädte	99,8	29,5	70,3
	Mittelstädte	99,2	28,4	70,8
	Kleinstädte	99,9	28,7	71,2
	Ländliche Gemeinden	100,0	26,8	73,2

Tabelle 4-61. Szenario 7 – PKW-Erreichbarkeit

Der Rückgang des PKW-Anteils ist sehr stark in den Szenario 7\_C\_1 und beträgt um 26,59% für inländische Fahrten und Fahrten aus/nach Ausland. Die meisten Reisenden steigen vom PKW auf den Schienenfernverkehr um und liegt um 20,90%. Es gibt auch c.a. 3,90% der PKW-Fahrer, die auf Fernbus umsteigen. Die Erhöhung in Flugzeug ist relativ gering und liegt um 1,79%.

Ziel-Typ	Mode	Basis(%)	Szenario 7_C_1	
			Wert (%)	Diff. zum Basisszenario (%P)
Inland und Ausland	PKW	77,60	51,01	-26,59
	Fernzug	12,07	32,97	20,90
	Fernbus	3,56	7,46	3,90
	Flugzeug	6,77	8,56	1,79
Inland*	PKW	83,61	56,26	-27,35
	Fernzug	13,05	36,40	23,35
	Fernbus	3,34	7,34	4,00

\*Inländische Fahrten und der Anteil des Landverkehrs wurden zum Vergleich mit dem aggregierten Modell neu berechnet.

Tabelle 4-62. Szenario 7 – Modal Split

Wie erwartet, wirkt sich die Verringerung des PKW-Anteils auch auf die Verkehrsbedingungen aus, die sich deutlich verbessern (Tabelle 4-63). Der Anteil der überlasteten Straßen in der Spitzenstunde (entweder über 50 % oder über 75 % der Kapazität) wird erheblich reduziert, aber dieser Effekt ist nur auf Autobahnen zu beobachten.

Die Fahrtleistung verringert sich auf den Autobahnen um bis zu 45 %, während sie auf den übrigen Straßen weniger stark abnimmt. Auch die Verspätung wird auf Autobahnen um 26,4 % verringert, während die Auswirkungen auf den übrigen Straßen geringer sind.

Verkehrsbezogene Indikatoren	Straßentyp	Basis	Szenario 7	
			Wert	Diff. zum Basiswert (%P)
Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.5 V/C Auslastung (%)	Autobahnen	20,3	7,3	-13,0 %P
	Bundesstraßen	3,1	2,1	-1,1 %P
	Sonstige	1,1	1,0	-0,1 %P
Verkehrsstärken: Anteil der Straßenlänge von mehr als 0.75 V/C Auslastung (%)	Autobahnen	3,8	1,1	-2,7 %P
	Bundesstraßen	0,3	0,3	0,0 %P
	Sonstige	0,4	0,4	0,0 %P
Fahrtleistung des Fernverkehrs (Mio. km/Tag)	Autobahnen	370,2	200,7	-45,8 %
	Bundesstraßen	64,9	41,2	-36,4 %
	Sonstige	184,8	131,2	-29,0 %
Durchschnitt Verlustzeiten im Verkehr durch Stauaufkommen (%)	Autobahnen	8,7	6,5	-26,4 %
	Bundesstraßen	2,3	2,0	-11,5 %
	Sonstige	8,2	8,7	6,5 %

Tabelle 4-63. Szenario 7 – Verkehrsbezogene Indikatoren

Bei den Umweltindikatoren ist ein Rückgang der Emissionen zu beobachten (Tabelle 4-64). Diese Tendenz ist zu erwarten, da das Szenario 7 nur auf PKW-Nutzer abzielt, indem es die Kosten für PKW-Fahrten erhöht. Bei den Schallemissionen ist die stärkste Verringerung bei den Bundesstraßen mit 3,23%P zu verzeichnen. Die Reduzierung der Gasemissionen ist bedeutender als die Reduzierung der Schallemissionen. Die höchste Reduzierung der Gasemissionen von 45% und mehr wird auf Autobahnen beobachtet.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Umweltbezogene Indikatoren	Straßentyp	Basis	Szenario 7	
			Wert	Diff. zum Basisszenario (%)
Schallemissionspegel: Anteil der Straßenlänge von mehr als 80 dB(A) (%)	Autobahnen	91,58	90,98	-0,64%P
	Bundesstraßen	61,81	58,58	-3,23%P
	Sonstige	16,85	15,81	-1,05%P
Schallemissionspegel: Spitzenstunde (Mittelwert) in dB(A)	Autobahnen	86,59	85,26	-1,33
	Bundesstraßen	69,72	68,11	-1,61
	Sonstige	37,09	35,37	-1,72
CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Tag (Tausend t)	Autobahnen	37,51	20,32	-45,83
	Bundesstraßen	6,98	4,43	-36,53
	Sonstige	21,39	15,32	-28,38
CO-Emissionen pro Tag (t)	Autobahnen	41,67	22,55	-45,88
	Bundesstraßen	13,85	8,80	-36,46
	Sonstige	27,16	19,64	-27,69
HC-Emissionen pro Tag (t)	Autobahnen	2,56	1,39	-45,79
	Bundesstraßen	0,62	0,39	-37,10
	Sonstige	1,67	1,21	-27,54
NO <sub>x</sub> -Emissionen pro Tag (t)	Autobahnen	83,42	45,17	-45,85
	Bundesstraßen	18,04	11,46	-36,47
	Sonstige	49,13	35,26	-28,23
Feinstaub pro Tag (t)	Autobahnen	0,86	0,46	-46,51
	Bundesstraßen	0,18	0,11	-38,89
	Sonstige	0,51	0,37	-27,45

Tabelle 4-64. Szenario 7 – Umweltbezogene Indikatoren

Die Zusammenfassung der Änderungen bei den CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen ist in Tabelle 4-65 dargestellt. Da sich Szenario 7 nur auf die Erhöhung der Kosten für die PKW-fahrt konzentriert, können wir in diesem Szenario im Vergleich zum Basisszenario eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen des Autos beobachten. Allerdings ist auch zu erkennen, dass anstelle des Autos andere Verkehrsmittel für die Durchführung einer Reise gewählt wurden. Daraus ergibt sich ein erwarteter Anstieg der CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen bei allen anderen Verkehrsträgern, mit dem höchsten Anstieg von 280,81% bei dem Fernzug, gefolgt vom Fernbus (260,46%). Der Anstieg der Luftemissionen wurde auf 25,99% oder 13.377,29 Tonnen geschätzt. Trotz eines solch starken Anstiegs der Emissionen bei den Verkehrsträgern Fernzug und Fernbus wird die Gesamtmenge der Emissionen in diesem Szenario um 45.182,22 Tonnen (19,65%) reduziert.

Verkehrsmittel	Basis	Szenario 7	
		Wert	Diff. zum Basisszenario (%)
Flugzeug	51.477,91	64.855,20	25,99
PKW	172.396,10	97.208,65	-43,61
Fernbus	1.288,55	4.644,71	260,46
Fernzug	4.726,18	17.997,95	280,81
Gesamt	229.888,73	184.706,51	-19,65

Tabelle 4-65. Szenario 7 – CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen

Die Veränderungen bei den Fahrtkosten für verschiedene Haushaltseinkommensgruppen sind in Tabelle 4-66 zusammengefasst. Es ist festzustellen, dass die Fahrtkosten für alle Einkommensgruppen gestiegen sind, wobei der höchste Anstieg für Haushalte mit niedrigem und sehr niedrigem Einkommen mit 17,09% bzw. 29,51% zu verzeichnen ist.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Ökonomischer Status des Haushalts	Basis	Szenario 7	
		Wert	Diff. zum Basisszenario (%P)
sehr hoch	4,84	10,29	5,45
hoch	9,00	19,31	10,31
mittel	12,38	25,35	12,97
niedrig	16,93	34,02	17,09
sehr niedrig	26,61	56,12	29,51

Tabelle 4-66: Szenario 7 – Belastung der Haushalte durch Bepreisung nach Einkommensgruppen

#### 4284.0.0. Aggregiertes Modell

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Das zusätzliche Szenario setzt nun eine konsequente Bepreisung aller mit dem PKW zurückgelegten Kilometer um. Im Verkehrsmittelwahlmodell ändern sich also die Kosten für dieses Verkehrsmittel teilweise drastisch. Die folgende Tabelle 4-67 zeigt, dass sich hierbei zum ersten Mal die Anteile des PKW erheblich ändern. Allerdings geschieht dies auch erst bei Preisen, die aktuell nicht unbedingt realistisch erscheinen. Während Preise von 20ct/km den PKW-Verkehr um nur knapp einen Prozentpunkt reduzieren, wechseln bei einem Preis von 2€/km knapp 30% das Verkehrsmittel, der größte Teil zu Gunsten der Bahn.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Szenario	Variante	Modal Split			Diff. zum Basisszenario		
		PKW	Fernbus	Fernzug	PKW	Fernbus	Fernzug
Basis	-	85,3%	2,9%	11,7%	-	-	-
7	7_A_1	84,42%	3,11%	12,47%	-0,92%P	0,18%P	0,74%P
	7_B_1	79,81%	4,03%	16,15%	-5,53%P	1,10%P	4,42%P
	7_C_1	71,88%	5,63%	22,49%	-13,46%P	2,70%P	10,76%P
	7_D_1	56,79%	8,64%	34,57%	-28,55%P	5,71%P	22,84%P

Tabelle 4-67: Szenario 7 im aggregierten Modell – Modal Split

Die Variante 7\_C\_1 mit einem Preis von 1€/km wurde genauer betrachtet und im Modell mit einer erneuten Verkehrsumlegung berechnet. Daraus wurden die Werte der Indikatoren ermittelt, die in Tabelle 4-68 dargestellt sind. Auch hier lässt sich eine deutliche Reduktion der gefahrenen Fahrzeugkilometer und der Emissionen feststellen.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Indikator	Basis	Szenario 7	
		Wert	Diff. zum Basisszenario
Modal Split – PKW	85,34%	72,02%	-13,32%P
Modal Split – Fernbus	2,93%	5,59%	2,66%P
Modal Split – Fernzug	11,73%	22,39%	10,66%P
Fahrleistung [Mio. km]	690,64	597,80	-13,44%
CO <sub>2</sub> -äquivalente [Tsd. t/Tag]	111,10	101,11	-8,99

Tabella 4-68. Szenario 7 im aggregierten Modell – Indikatoren

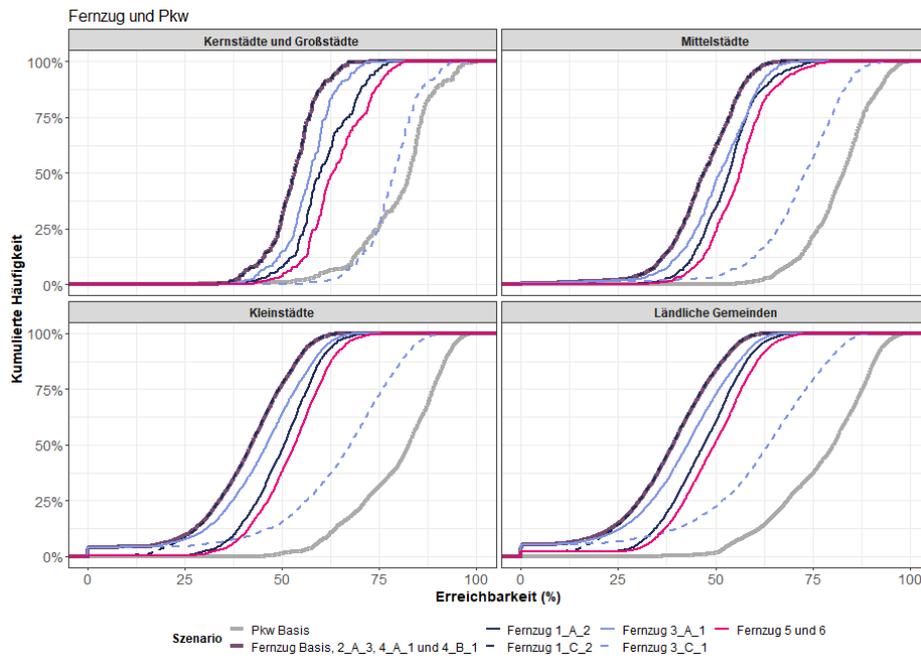
## 4375.4. SeSchlussfolgerungen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Schlussfolgerungen des Projekts vorgestellt. Zunächst werden ~~wird die Modellergebnisse erörtert, wobei besonderes~~ Augenmerk auf den Vergleich zwischen den Modellen ~~und den verschiedenen Szenarien gelegt wird.~~ Abschließend Zweitens werden die Grenzen der Projektmethode aufgezeigt, und es werden mögliche Verbesserungen vorgeschlagen. ~~Abschließend werden praktische Empfehlungen gegeben.~~

### 4375.1. Diskussion

~~Die getesteten Maßnahmen, die den Bahnverkehr betreffen, erhöhen die Erreichbarkeit in allen Gebietstypen (Bild 5-1). Das extreme Deutschlandtakt-Szenario (3\_C\_1) erreicht die beste Verbesserung der Erreichbarkeit (bis zu Werten in der Größenordnung des PKWs), insbesondere für die Kernstädte. In kleinen Gemeinden und ländlichen Gemeinden kann selbst eine Verdoppelung der Bahngeschwindigkeit noch nicht die gleiche Erreichbarkeit wie das Auto erzielen. Dies könnte darauf hindeuten, dass andere Verbesserungen an der Schiene erforderlich sind, wie z. B. die Erhöhung der Anzahl der Haltestellen entlang bestehender Strecken oder das Einrichten neuer Strecken in Gebieten, die derzeit nicht mit der Schiene angeschlossen sind. Da es technisch (und wirtschaftlich) nicht machbar erscheint, die Geschwindigkeit des Fernverkehrs zu verdoppeln, ist die zweitbeste Option zur Verbesserung der Erreichbarkeit der Bahn das Szenario 5. Interessanterweise hat diese Strategie nicht nur die durchschnittliche und maximale Erreichbarkeit erhöht (nach dem Szenario 1\_C\_1), sondern auch die Anzahl der Zonen mit einer Erreichbarkeit von weniger als 25% verringert. Dieses Szenario hilft also insbesondere den Nutzern mit der niedrigsten Erreichbarkeit. Dieser Effekt wurde durch die Einführung des Ridopoolings als Zugangs- bzw. Abgangsmodus verursacht. Die Deutschlandtakt-Maßnahme verbessert nicht die Erreichbarkeit der am schlechtesten zugänglichen Gebiete, aber verbessert alle Gebietstypen gleichmäßig. Eine weitere Option, die nicht getestet wurde, um die allgemeine Reisezeit (und damit die Zugänglichkeit) zu verbessern, wäre die Verringerung des Unterschieds zwischen den Kosten für die Bahn und das Auto im Fernverkehr.~~

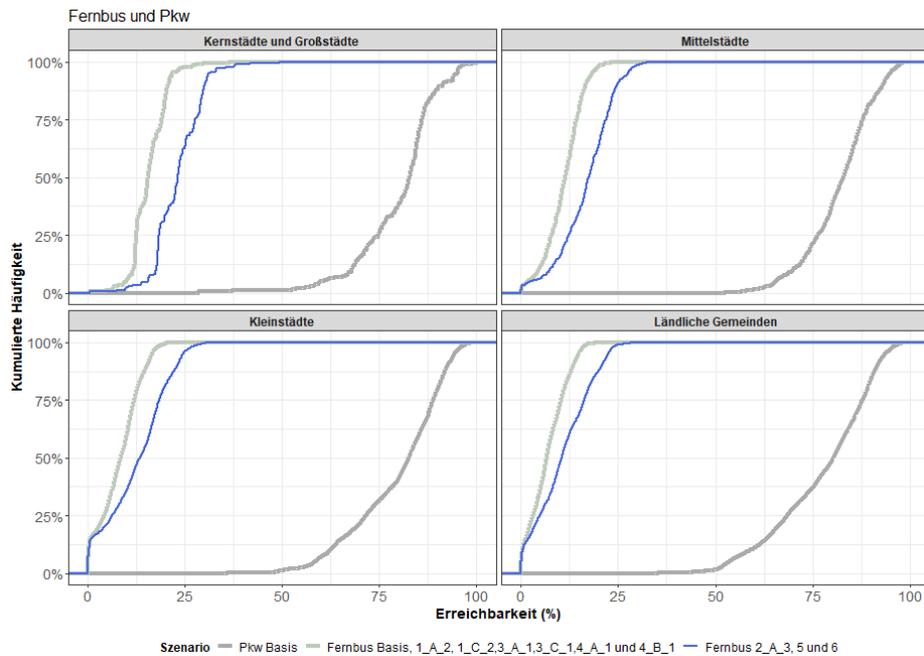
Formatiert: Deutsch (Deutschland)



**Bild 5-1. Fernzug und PKW Erreichbarkeit**

Eine Maßnahme wurde für Fernbusse getestet: die Verbesserung der Geschwindigkeit auf Strecken mit schlechtem Service und eine Senkung der Mehrwertsteuer (Bild 5-2). Das führte zu einer Verbesserung der Buserreichbarkeit in allen Gebietstypen, wobei die Verbesserung in den Kernstädten, die über mehr Strecken verfügen, größer war. Dieses Ergebnis könnte darauf hindeuten, dass für schlecht angebundene Gebiete andere Maßnahmen in Betracht gezogen werden sollten, wie z. B. die Einrichtung weiterer Strecken oder die Erhöhung der Anzahl der Haltestellen. Eine weitere Möglichkeit ist das Angebot eines Ridepoolings, ähnlich wie in Szenario 1 für den Schienenfernverkehr. Diese Maßnahme verbesserte die Erreichbarkeit zu Fernbusstationen insbesondere für ländliche Gebiete und für die am schlechtesten zugänglichen Gebiete, unabhängig von ihrem Gebietstyp. In jedem Fall haben die getesteten Maßnahmen die Erreichbarkeit des Busses deutlich verbessert, aber die Werte sind im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern immer noch gering.

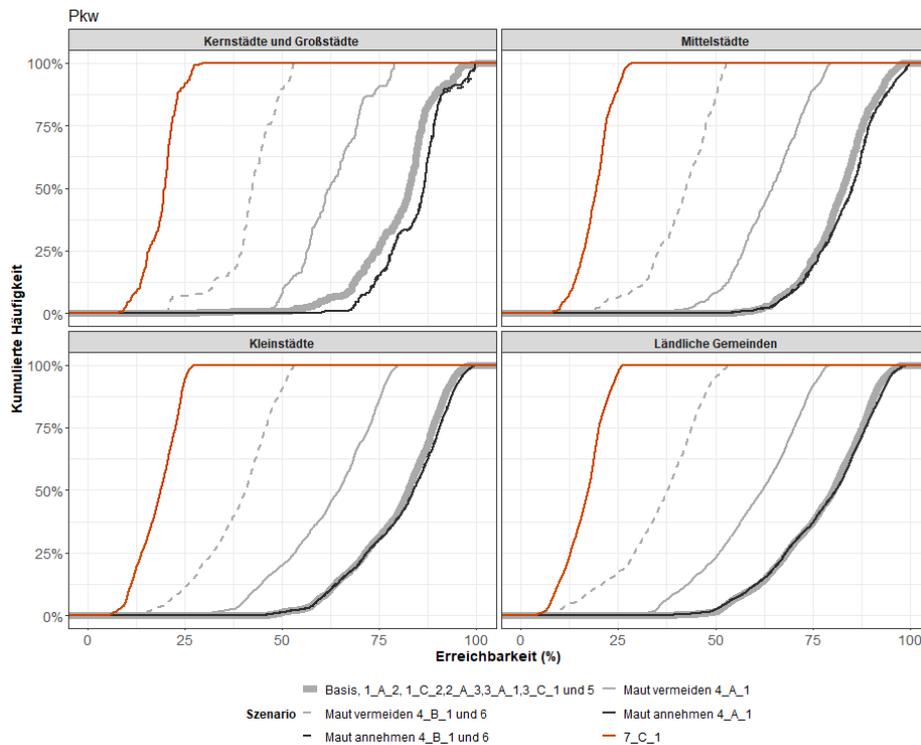
Formatiert: Deutsch (Deutschland)



**Bild 5-2. Fernbus und PKW Erreichbarkeit**

In Bezug auf der Erreichbarkeit mit dem Auto (Bild 5-3) konnten wir feststellen, dass die Einführung von Mautgebühren die Erreichbarkeit für Reisende verbessert, die die Maut zahlen würden, und stark verringert für Autoreisende, die Mautgebühren vermeiden. Der Verkehrsstau in der Nähe der Kernstädte wird durch die Umleitung des Verkehrs auf nicht mautpflichtige Straßen verbessert, was zu einer höheren Erreichbarkeit der Kernstädte führt. Außerdem nimmt der Anteil der Bevölkerung mit hoher Erreichbarkeit zu. Die Verbesserung der Erreichbarkeit ist jedoch für ländliche und kleine Gemeinden praktisch vernachlässigbar. Auf der anderen Seite wird die Erreichbarkeit für Reisende, die aufgrund längerer Strecken die Maut vermeiden, erheblich reduziert. Dieser Unterschied verschärft sich noch, wenn die Maut auf Bundesstraßen ausgedehnt wird. Schließlich hat das zusätzliche Szenario die Erreichbarkeit mit dem Auto stark verringert. Die Erreichbarkeitswerte sind sogar niedriger als im Mautszenario.

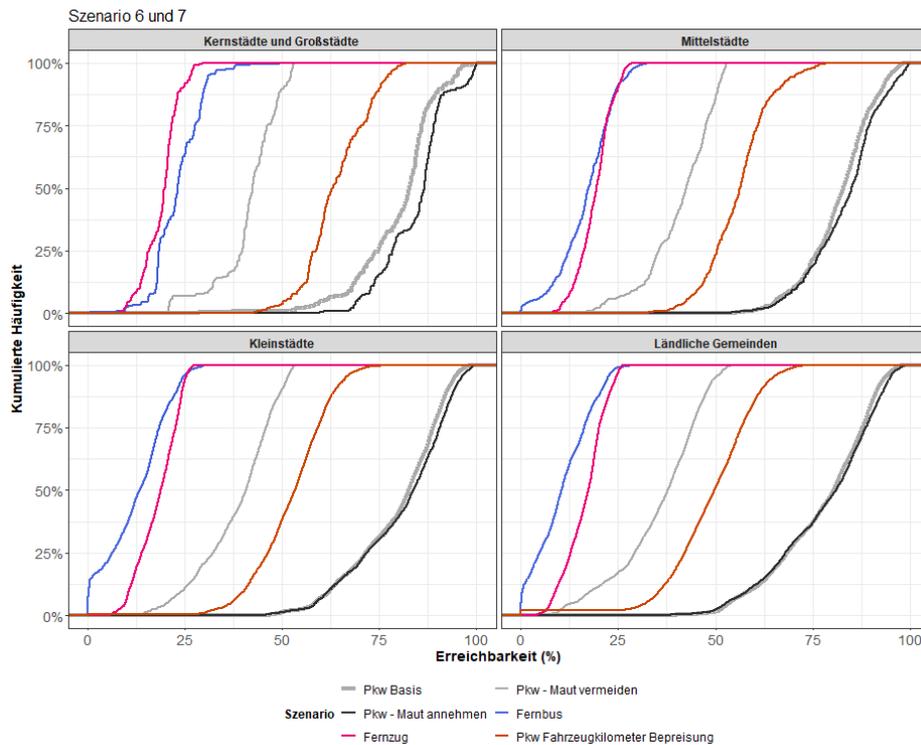
Formatiert: Deutsch (Deutschland)



**Bild 5-3. PKW-Erreichbarkeit nach Gebietstypen und Szenarien**

Die Erreichbarkeit nach Verkehrsmittel wurde für das Szenario 6 analysiert (Bild 5-4). Es ist festzustellen, dass die Erreichbarkeit der Bahn in diesem Szenario größer ist als die Erreichbarkeit für Autofahrer, die die Mautgebühren vermeiden. Die Erreichbarkeit für Reisende, die Mautgebühren zahlen, ist jedoch erheblich höher als die der Bahn. Um die Schiene wettbewerbsfähiger zu machen, könnten die Reisekosten des Autos höher oder die Reisezeiten länger gemacht werden.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

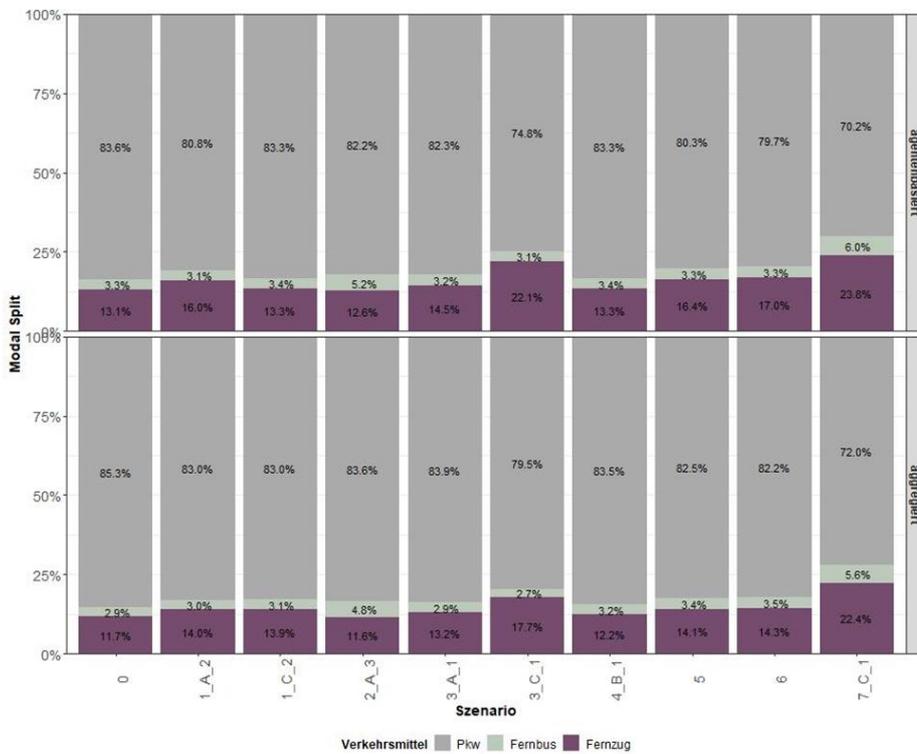


**Bild 5-4. Erreichbarkeitsvergleich je Verkehrsmodus für das Szenario 6 und 7**

Im Gegensatz zur Erreichbarkeit, die das Nachfragepotenzial beschreibt, bezieht sich der Modal Split direkt auf die Nachfrage. Der Modal Split für PKW, Bus und Bahn über alle Szenarien wird in Bild 5-5 dargestellt. Diese Bild zeigt die Ergebnisse dieses Indikators unter Verwendung des agentenbasierten Modells (oben) und des aggregierten Modells (unten).

Ein Blick auf die Ergebnisse des agentenbasierten Modells zeigt, dass das Auto in allen Szenarien ein dominierendes Verkehrsmittel bleibt. Die deutlichste Verringerung der Autofahrten wird in dem unrealistischen Szenario 3\_C\_1 beobachtet (Deutschlandtakt mit 50% Reduktion der Reisezeit), wo der Autoanteil um 8,8% im Vergleich zum Basisszenario gesunken ist. Alle anderen Szenarien verringern den Anteil der Autofahrten in geringerem Umfang. Der signifikanteste Anstieg des Bahnanteils um 9,1% im Vergleich zum Basisszenario wurde wiederum im unrealistischen Szenario 3\_C\_1 beobachtet. Ein Rückgang der Bahnfahrten um 0,4% ist nur im Szenario 2\_A\_3 zu beobachten, wo die Busverbindungen verbessert und die Kosten für ein Busticket gesenkt wurden.

Der signifikanteste Anstieg des Busanteils von 1,9% zeigt sich in Szenario 2\_A\_3, in dem lediglich das Busnetz verbessert wird. Die Einführung der Straßenmaut führt nicht zu einer Verkehrsverlagerung zu anderen Verkehrsmitteln (Straßenverkehr wird lediglich von bestimmten Straßentypen auf andere verlagert, wie später beschrieben). Der Anstieg der Anteile von Bahn und Bus in Szenarien 5 und 6 ist vergleichbar mit dem Anstieg in den Szenarien 2\_A\_3 und 1\_C\_2. Das Szenario 7 zeigt, wie bereits erwähnt, die stärkste Veränderung im Modalsplit. Dies ist nur vergleichbar mit dem Szenario 3\_C\_1, mit extremen Verkürzungen der Reisezeiten mit der Bahn.



**Bild 5-5. Modal Split mit dem agentenbasierten (oben) und dem aggregierten (unten) Modell**

Die Bild 5-6 stellt einen Vergleich der beiden Modellansätze dar. Abgebildet ist jeweils die Differenz im Modal Split in Vergleich zum Basisszenario. Der Vergleich bezieht sich nur auf die inländischen Fahrten mit Auto, Bus und Bahn. Während die generellen Trends sehr ähnlich sind und die

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

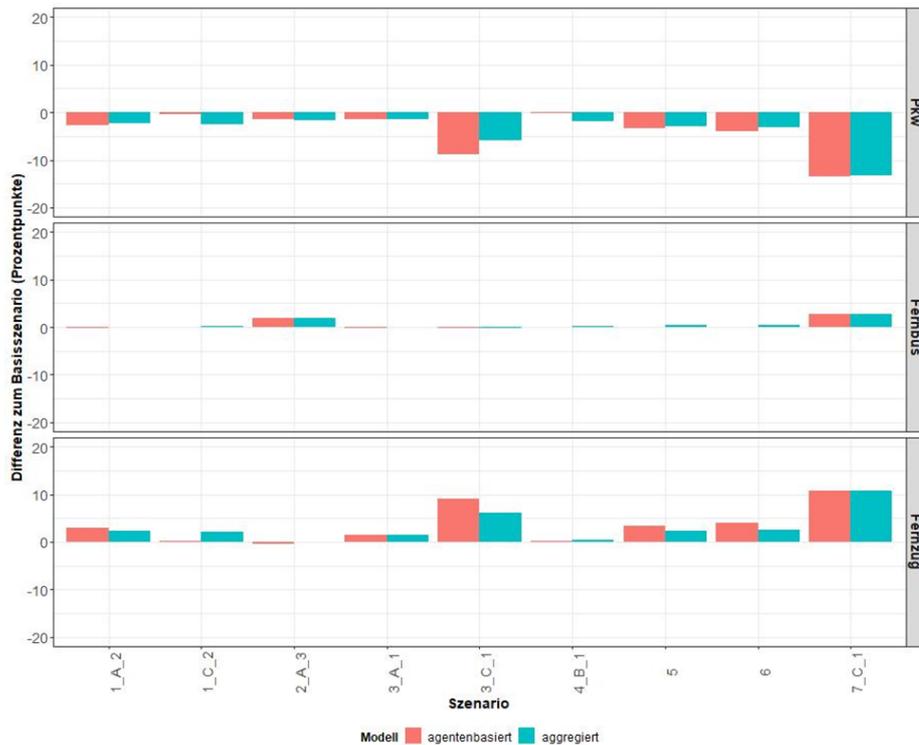
Verlagerungen in der Verkehrsmittelwahl stets in die gleiche Richtung gehen, sind die Größenordnungen der Veränderungen teilweise unterschiedlich.

Das agentenbasierte Modell reagiert sensitiver auf Änderungen der Kosten und Reisezeiten im Bahnverkehr. In diesem Modell kann beobachtet werden, dass eine Steigerung der Kosten für die Zufahrt zum Bahnhof (im Szenario 1\_C\_2 im Vergleich zum Szenario 1\_A\_2) im agentenbasierten Modell zu einem geringeren Anteil der Bahnfahrten führt. Dies ist im aggregierten Modell nicht zu beobachten. Ebenso zeigt sich in den Szenarien, in denen die Reisezeiten mit dem Zug substantiell reduziert werden (von Szenario 3\_A\_1 zu Szenario 3\_C\_1 um 10% bzw. 50%) eine Steigerung der Nachfrage für den Bahnverkehr. Im aggregierten Modell ist die Größenordnung der Nachfrageänderungen kleiner.

Im Maut-Szenario 4\_B\_1 zeigt sich ein umgekehrter Effekt: aus dem aggregierten Modell ergibt sich eine stärkere Reduktion des PKW-Anteils in der Verkehrszusammensetzung. Dies war zu erwarten, da das aggregierte Modell nur die Straßen des hochrangigen Straßennetzes beinhaltet und es somit schwieriger für Fahrer wird, Routen zu finden, die die Maut vermeiden. Das Vorhandensein von mehr Straßen aus dem untergeordneten Straßennetz (bis zum Level "tertiary" in OpenStreetMaps) macht es im agentenbasierten Modell leichter, dass PKW-Fahrer mautfreie Alternativrouten finden.

Die kombinierten Szenarien haben im agentenbasierten Modell eine stärkere Wirkung, was den bereits erwähnten höheren Sensitivitäten zustimmt. Im Allgemeinen führen die Maßnahmenkombinationen zu einem Effekt, der ungefähr der Summe der Einzeleffekte entspricht.

Schließlich ist die Sensitivität beider Modelle gegenüber eine Erhöhung der Fahrtkosten (Szenario 7\_C\_1) mit dem PKW sehr ähnlich.



**Bild 5-6. Änderung der Verkehrsmittelanteile verschiedener Szenarien im Vergleich zum Basisszenario**

Die Veränderungen der Tagesfahrleistung von PKW (Nahverkehr und Fernverkehr) und LKW auf verschiedenen Straßentypen und über alle Szenarien sind in

Bild 5-7 dargestellt. Dieses Ergebnis wurde mit dem agentenbasierten Modell generiert. Der Bild zeigt, dass Autobahnen der Straßentyp mit dem höchsten Anteil des Fernverkehrs sind. Auf den Autobahnen wird die signifikanteste Verringerung der Tagesfahrleistung des Fernverkehrs durch die Umsetzung von Szenario 7\_C\_1 erreicht. Diese Verringerung im 7\_C\_1 wird auch auf den übrigen Straßen beobachtet. Auch auf den Autobahnen wird eine signifikanteste Verringerung der Tagesfahrleistung im Szenario 4\_A\_1 erreicht, gleichzeitig sehen wir den höheren Anstieg der Fahrleistung auf Bundesstraßen und anderen Straßentypen (was darauf hindeutet, dass Ströme aufgrund der Einführung der Maut verlagert werden). Die anderen Segmente der Nachfrage verändern sich wenig, weil die Szenarien den Nah- und der Güterverkehr kaum beeinflussen.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

In Bild 5-8 ist derselbe Indikator für alle Straßentypen dargestellt. Dies bestätigt, dass die wichtigsten Veränderungen in den Szenarien 4\_A\_1, 4\_B\_1 und 6 nach Straßenart (aufgrund der Einführung von mautpflichtigen Autobahnen) nicht zu einer Verringerung der Gesamtfahrleistung führen, sondern lediglich zu einer Verlagerung der Verkehrsströme von einer Straßenart auf eine andere. Das Szenario 7\_C\_1 zeigt allerdings eine effektive Reduktion auf allen Straßentypen.

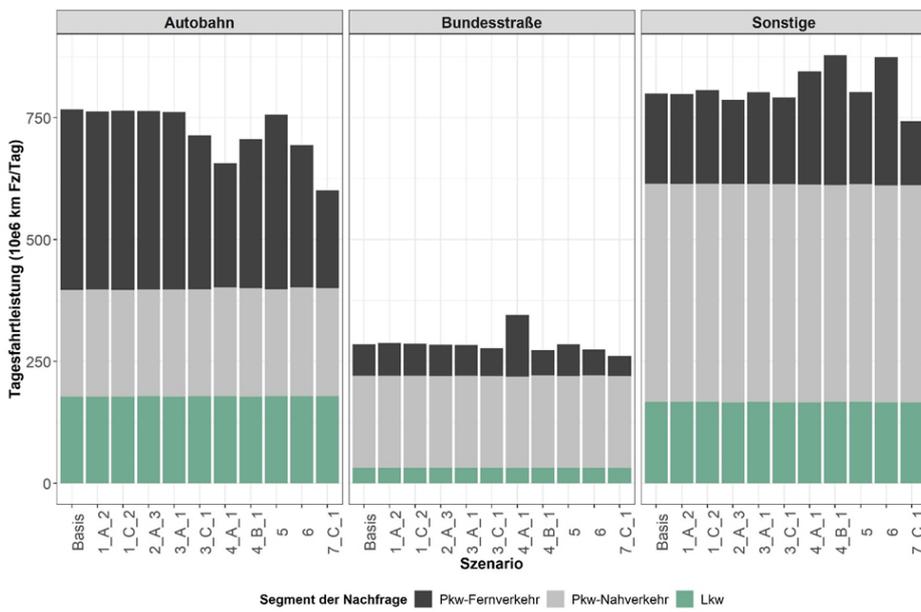
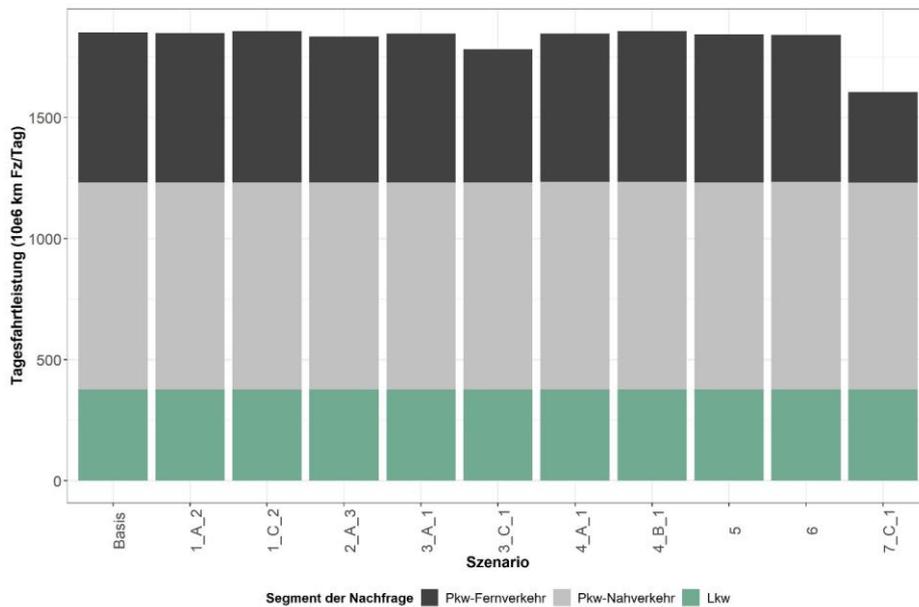


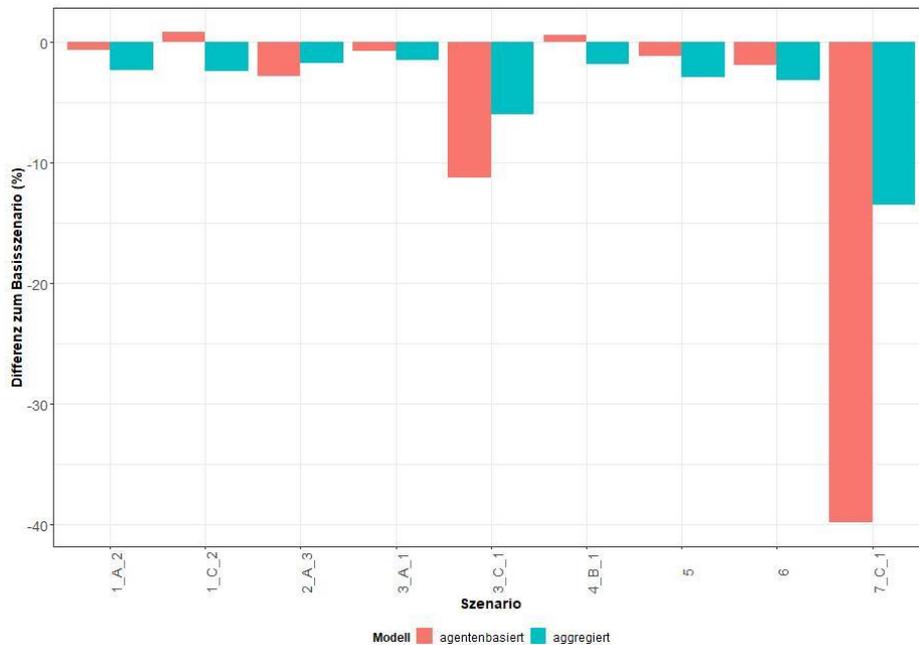
Bild 5-7. Tagesfahrleistung nach Straßentyp und Segment der Nachfrage



**Bild 5-8. Tagesfahrleistung nach Segment der Nachfrage**

Da das aggregierte Modell auch die Tagesfahrleistung berechnet hat, wurde ein Vergleich zwischen beiden Modellen durchgeführt. Leider kann das aggregierte Modell die Fahrleistung des Nahverkehrs oder des LKW-Verkehrs nicht ermitteln (beide Segmente werden nicht explizit simuliert, sondern lediglich als Hintergrundverkehr betrachtet). Deswegen ist der Vergleich der Modelle auf den Fernverkehr begrenzt. Bild 5-9 zeigt die Differenz in Prozent in Bezug auf das Basisszenario. Die Szenarien mit Maßnahmen, die den Straßenverkehr nicht beeinflussen (2\_A\_3, 3\_C\_1, 3\_C\_2), zeigen in beiden Modellen ähnliche Tendenzen; die Reduktion der Fahrleistung ist im agentenbasierten Modell immer stärker. Szenarien mit nachfrageorientierten Mobilitätssystemen erhöhen im agentenbasierten Modell die Fahrleistung, da zusätzliche Ridepooling-Fahrten hinzugefügt wurden. Wenn Mautstraßen implementiert wurden, unterschieden sich die Annahmen der beiden Modelle. Im agentenbasierten Modell ist das Fahren auf Mautstraßen eine freie Wahl, während die Fahrer im aggregierten Modell die Maut nicht vermeiden können. Als Konsequenz führt das aggregierte Modell zu einer Verringerung der Tagesfahrleistung, wenn eine Maut implementiert wird. Das ist nicht der Fall in dem agentenbasierten Modell. Schließlich ist die Wirkung von der Erhöhung der PKW-Kosten (Szenario 7\_C\_1) auch starker im agentenbasierten Modell.

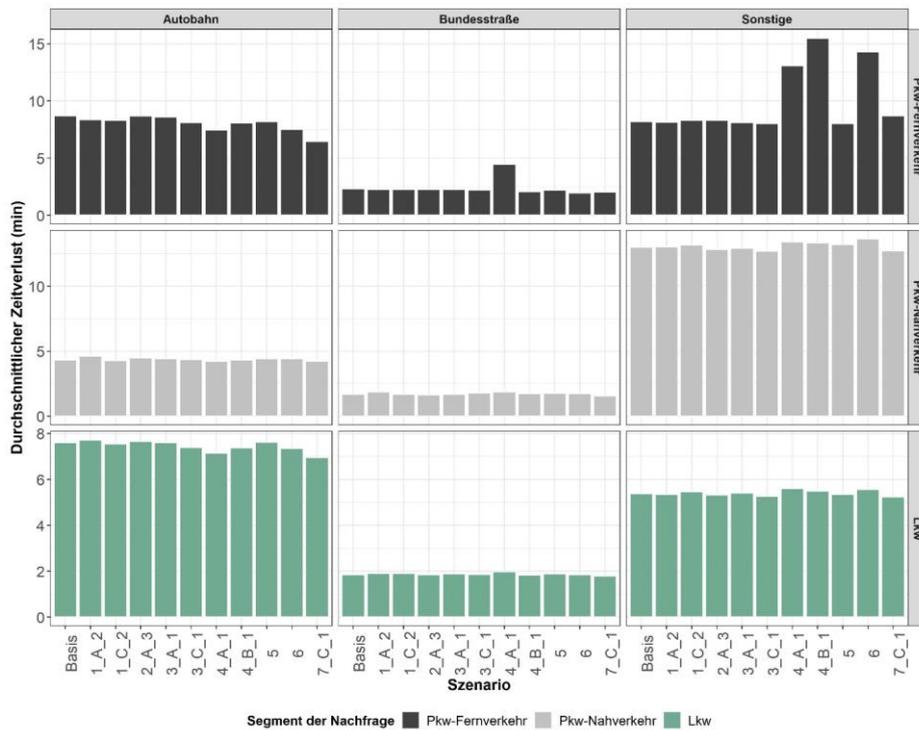
Formatiert: Deutsch (Deutschland)



**Bild 5-9. Vergleich der Tagesfahrleistung des Fernverkehrs je Szenario zwischen den Modellen**

~~Bild 5-10 zeigt die Veränderungen der durchschnittlichen Reisezeitverlustzeit in allen Szenarien. Diese wird ausschließlich auf der Grundlage der Ergebnisse des agentenbasierten Modells gemessen. Die durchschnittliche Verlustzeit bleibt im Allgemeinen über alle Szenarien stabil, da sie das Ergebnis der Durchschnittswerte der Reisezeiten aller Nutzer ist, einschließlich derer, die nicht von Stau betroffen sind. Dies würde bedeuten, dass sich die Verlustzeit nur dann ändert, wenn sich die Verkehrsströme erheblich unterscheiden. Dies ist bei den Szenarien 4\_A\_1 und 4\_B\_1 (mit mautpflichtigen Straßen), 6 (kombinierte Szenarien mit mautpflichtigen Straßen) und 7\_C\_1 (Erhöhung der PKW-Kosten) der Fall. In die Szenarien mit Mautstraßen nimmt die Verlustzeit auf den nicht mautpflichtigen Straßentypen zu (z. B. auf der Bundesstraße in Szenario 4\_A\_1 oder auf den übrigen Straßen in 4\_B\_1 und 6). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Verkehrsstärken auf mautfreien Straßen zunehmen und es dort zu einer höheren Überlastung kommt. Im Szenario 7\_C\_1 nimmt die Reisezeitverlust auf Autobahnen und Bundesstraßen ab, ohne deutliche Veränderungen auf sonstigen Straßen.~~

Formatiert: Deutsch (Deutschland)



**Bild 5-10. Zeitverlust nach Straßentyp und Segment der Nachfrage im agentenbasierten Modell**

In Bild 5-11 und Bild 5-12 wird der Anteil der Straßenzlängen mit den Verkehrsstärken von mehr als 50% bzw. 75% der Kapazität in der Spitzenstunde dargestellt. In beiden Bildern ist zu erkennen, dass die Überlastung auf den Autobahnen am höchsten ist, gefolgt von den Bundesstraßen und den übrigen Straßen. Die Szenarien mit Maut und das Szenario 7\_C\_1 sind die Szenarien, die die größten Veränderungen des Auslastungsgrads (gemessen als Verkehr/Kapazität in der Spitzenstunde) bewirken. Insbesondere im Szenario 4\_A\_1 (mautpflichtige Autobahnen) ist ein starker Rückgang des Auslastungsgrads auf den Autobahnen zu beobachten, auf Kosten eines Anstiegs des Auslastungsgrads auf den Bundesstraßen. Im Szenario 4\_B\_1 (mautpflichtige Autobahnen und Bundesstraßen) hat die Überlastung beider Straßentypen abgenommen (der Anteil über den Schwellenwerten vertikale Achsen ist niedriger als im Basisszenario). In 4\_B\_1 ist die Belastung der Autobahnen im Vergleich zu 4\_A\_1 geringer. Beide Mautszenarien führen zu einer leichten Zunahme der Überlastung der übrigen Straßen, die nicht Teil des

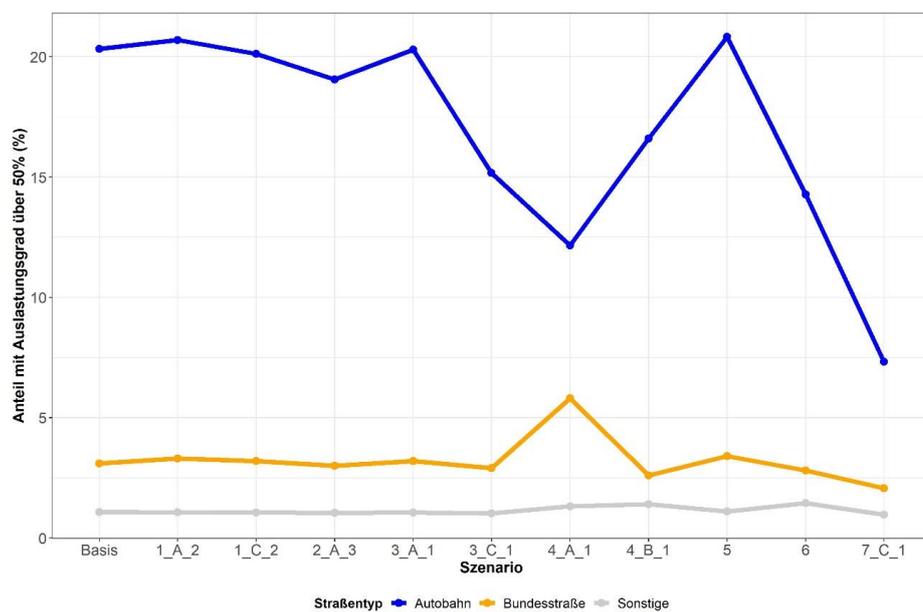
Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

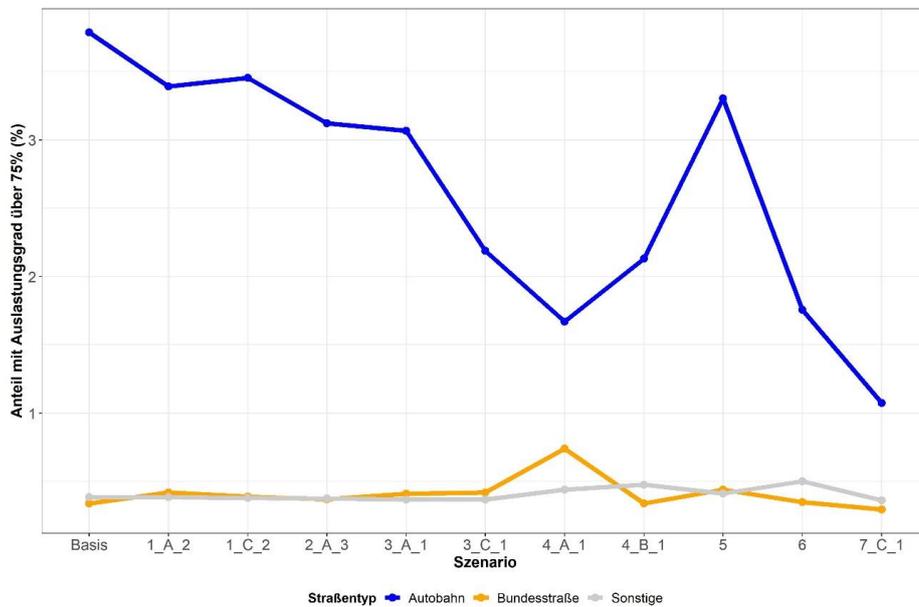
Bundesstraßennetzes sind. Im Szenario 7\_C\_1 wird der Anteil der Straßen über 50% bzw. 75% der Kapazität auf allen Straßentypen reduziert. Trotzdem nehmen beide Indikatoren am stärksten auf den Autobahnen ab.

Bei den anderen Szenarien, die keine Maut oder Erhöhung der PKW-Kosten beinhalten, ist die Verringerung der Staus viel geringer (in einigen Fällen kommt es zu einer Zunahme, wie im Fall von Szenario 1\_A\_2, wo die Ridepooling-Dienste auf Abruf aufgrund der zusätzlichen Nachfrage nach Ridepooling Fahrten eine Zunahme des Verkehrs verursachen). Nur die Szenarien mit einem starken Rückgang des Autoanteils (wie 3\_C\_1) führten zu einer signifikanten Veränderung der Verkehrsauslastung. In diesen Fällen sind die Veränderungen für die Autobahnen relevanter, da nur die Nachfrage im Fernverkehr auf andere Verkehrsträger verlagert wird.

Ein Vergleich der beiden Diagramme zeigt, dass die Veränderungen in der zweiten Darstellung relativ gesehen stärker ausfallen (Anteil von über 75% der Kapazität). Dies würde bedeuten, dass die Szenarien die Belastung auf den am stärksten überlasteten Strecken (mit schlechterem Level of Service) relativ gut vermeiden können, aber der Anteil der Straßen mit einem sehr guten Level of Service nicht erhöhen.

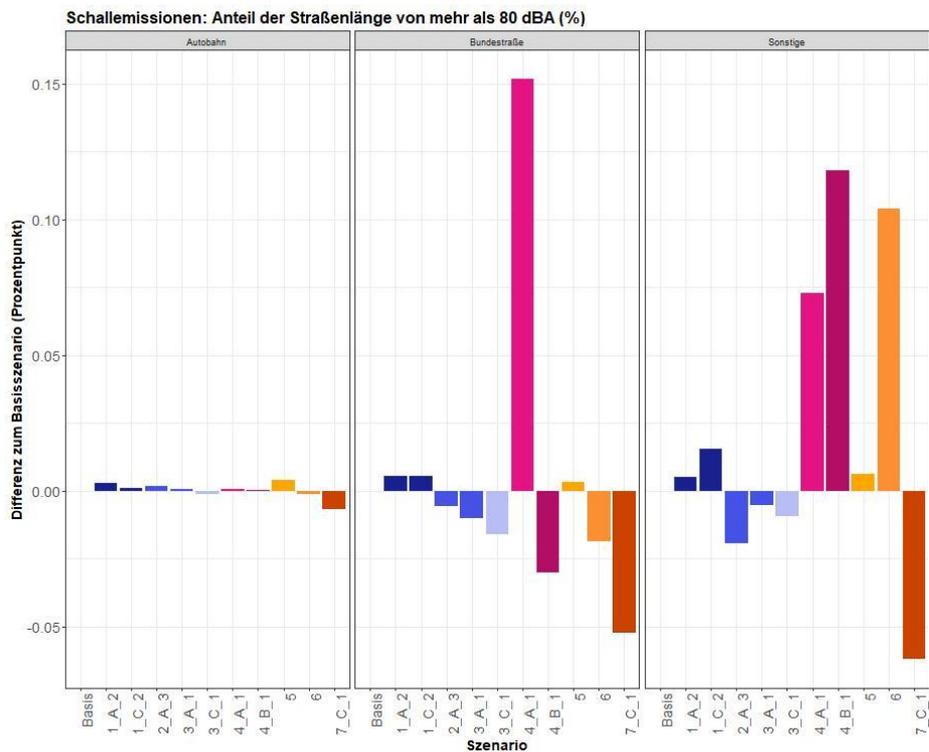


**Bild 5-11. Anteil von Straßen mit einem Auslastungsgrad über 50% nach Straßentyp**



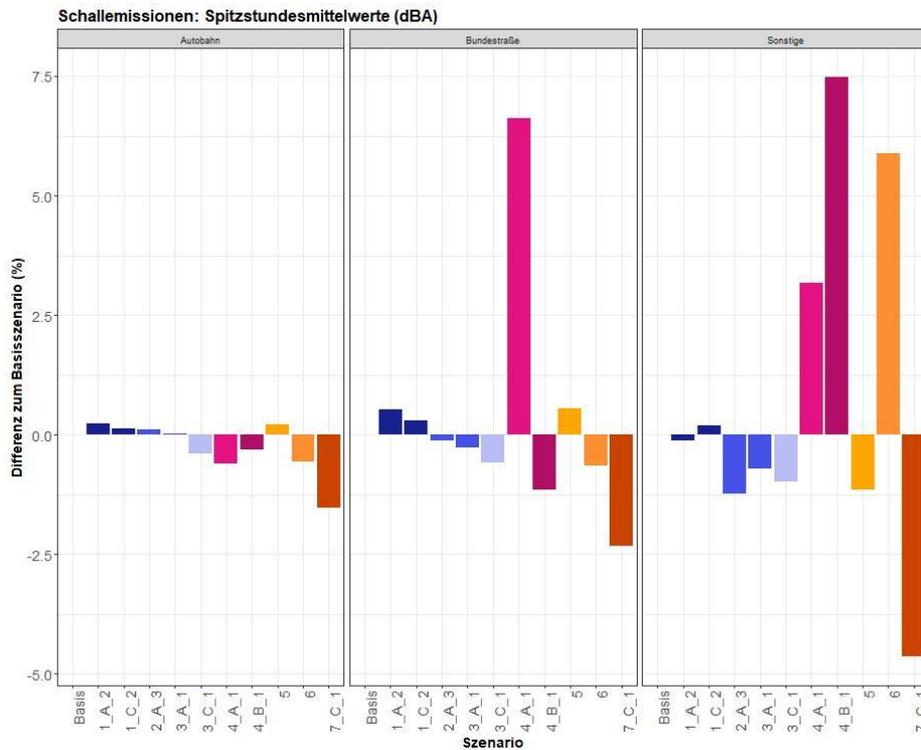
**Bild 5-12. Anteil von Straßen mit einem Auslastungsgrad über 75% nach Straßentyp**

Bild 5-13 fasst die Veränderungen der Schallemission für verschiedene Szenarien zusammen. Mit dieser Analyse soll der Unterschied bei der verkehrsbedingten Schallemission im Straßennetz bewertet werden, nicht aber der gefühlte Schall in bewohnten Gebieten. Diese Ergebnisse wurden nur mit dem agentenbasierten Modell erstellt. Insgesamt ist zu erkennen, dass sich die Anteile der Strecken mit einem Schallemissionspegel über 80 dB(A) auf den Autobahnen in allen Szenarien nicht wesentlich ändern und auf etwa 95% ihrer Länge der Netzwerk über dem Wert von 80 dB(A) liegt. Weil Autobahnen üblicherweise fernab von Wohngebieten liegen, beeinträchtigt dieser Schall üblicherweise Menschen nicht, und es wird erwartet, dass Autobahnen in der Spitzstunde laut sind. Mit der Einführung der Maut auf Autobahnen vergrößert sich die Länge des Bundesstraßennetzes, in dem 80 dB(A) Schallemissionspegel überschritten werden, um fast 5%, was auf die Verlagerung des Autoverkehrs von den Autobahnen auf die Bundesstraßen zurückzuführen ist (Szenario 4\_A\_1). Eine ähnliche Reaktion wird beobachtet, wenn die Maut sowohl auf den Autobahnen als auch auf den Bundesstraßen eingeführt wird. In diesem Szenario nimmt der Anteil sonstiger Straßen, der den 80 dB(A) Schallemissionspegel überschreitet, um 3,5% zu. Die Ergebnisse sind ähnlich in Szenario 6.



**Bild 5-13. Schall: Anteil der Straßenlänge mit einer Schallbelastung von mehr als 80 dB(A): Differenz zum Basiszenario**

Bild 5-14 zeigt die Veränderungen der durchschnittlichen Schallemissionspegel auf verschiedenen Straßentypen. Der Schallemissionspegel auf den Autobahnen kann maximal um 0,5 dB(A) gesenkt werden, wenn die Maut eingeführt wird (4\_A\_1). Gleichzeitig ist zu erkennen, dass die Schallemissionspegel auf den Bundesstraßen um 4,5 dB(A) und auf anderen Straßen um 2,8 dB(A) steigen, wenn dieses Szenario angewendet wird. Ähnliche Ergebnisse werden bei Szenario 6 beobachtet, bei dem die durchschnittlichen Schallemissionspegel auf Autobahnen um 0,5 dB(A) gesenkt werden, während sie auf anderen Straßentypen um 2,4 dB(A) ansteigen.

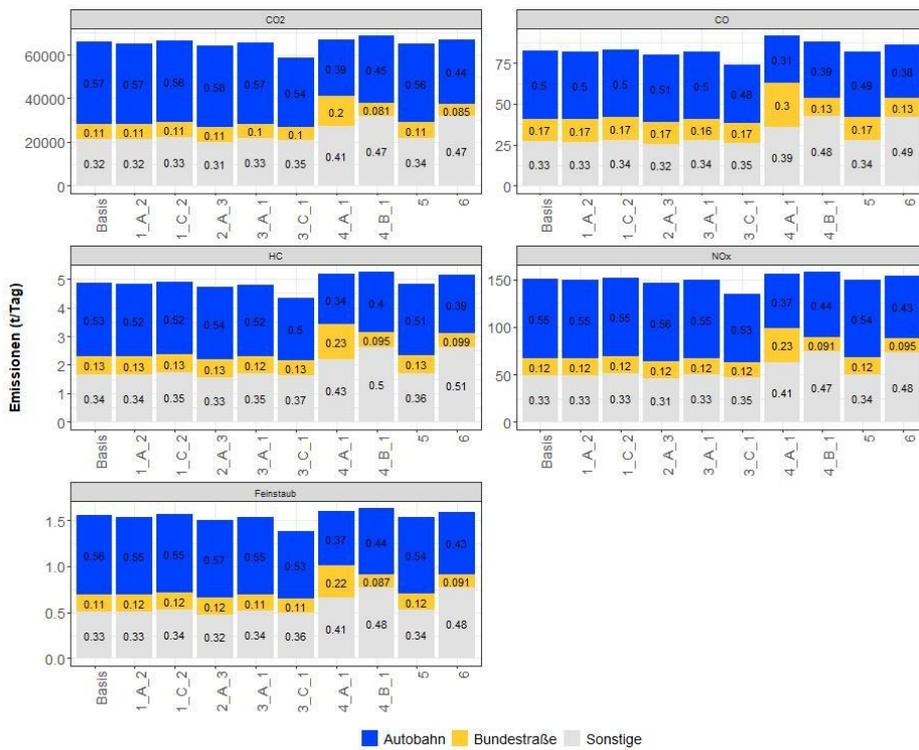


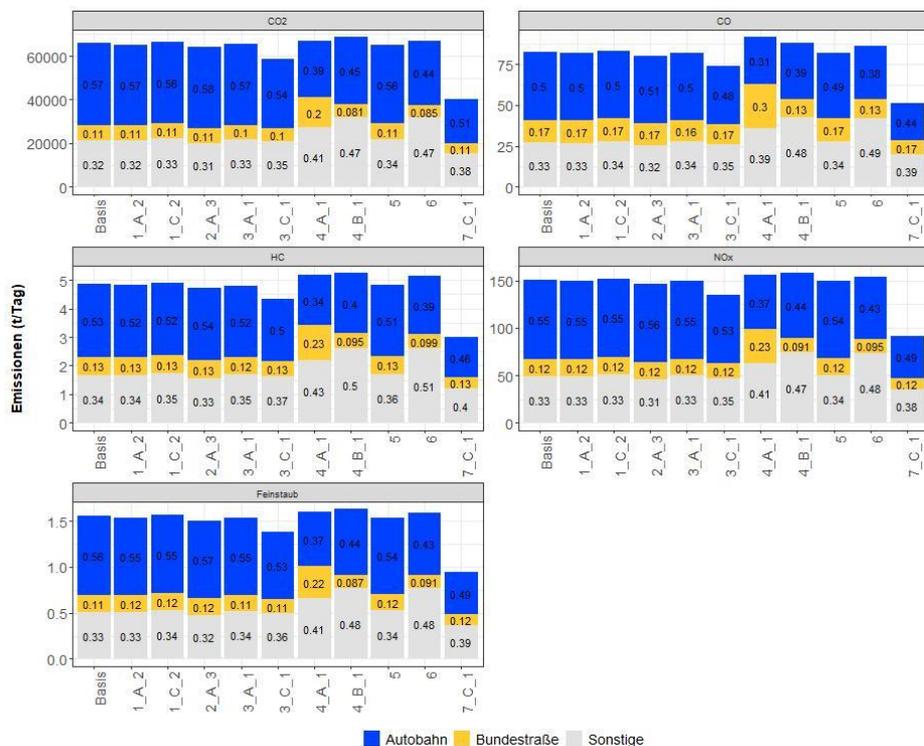
**Bild 5-14. Schall- Differenz der Spitzenstundenmittelwerte in dB(A) zum Basisszenario**

Bild 5-15 zeigt die Verteilung der Emissionen des Fernverkehrs mit dem Auto auf verschiedenen Straßentypen. Das wurde mithilfe des agentenbasierten Modells berechnet. Die Zahl auf jedem Balken gibt den Anteil der Emissionen an, die auf jedem Straßentyp für jedes der Szenarien ausgestoßen werden. In allen Szenarien wird im Allgemeinen ein höherer Anteil der Emissionen auf den Autobahnen ausgestoßen. Dieses Ergebnis ändert sich in Szenarien mit Mautgebühren (4\_A\_1, 4\_B\_1 und 6): um die Maut zu vermeiden, wird ein Teil des Verkehrs auf sonstige Straßentypen verlagert.

In den Szenarien 4\_A\_1 und 4\_B\_1 mit Mautstraßen werden die höchsten Emissionen erzeugt. Die Einführung der Maut zusammen mit der Verbesserung des öffentlichen Verkehrs führt zu leicht höheren Emissionswerten im Vergleich zum Basisszenario (Szenario 6).

Die höchste Emissionsreduktion ist zu beobachten, wenn das unrealistische Szenario 3\_C\_1 mit einer 50%igen Verkürzung der Reisezeit mit der Bahn eingeführt wird oder die Autokosten auf 1.0 €/km erhöht werden. In Szenario 7 werden die Emissionen um die Hälfte reduziert.

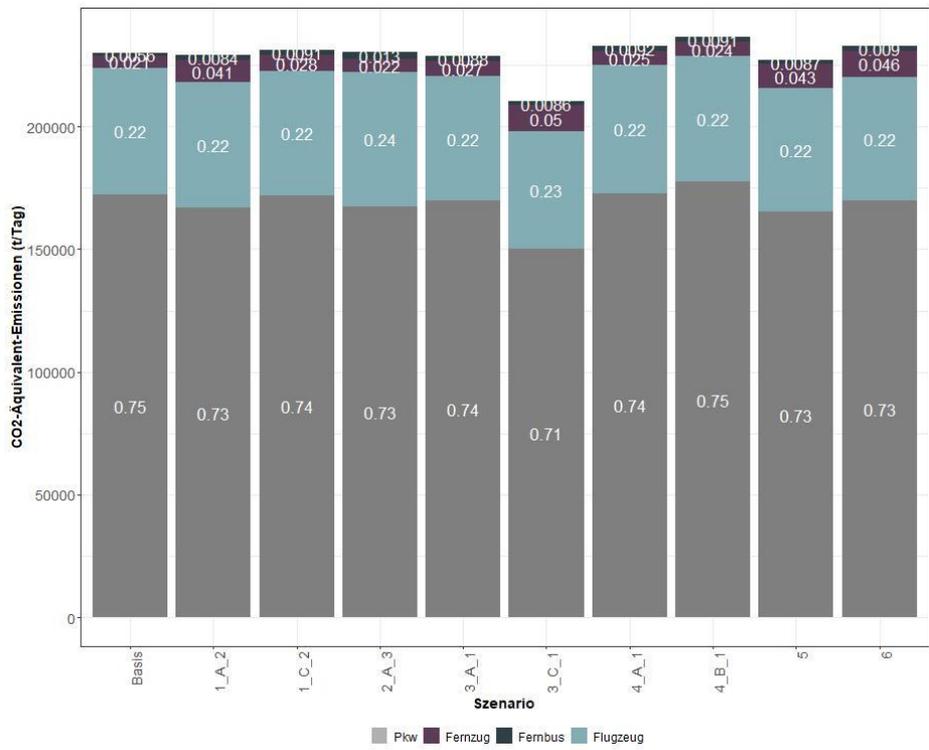


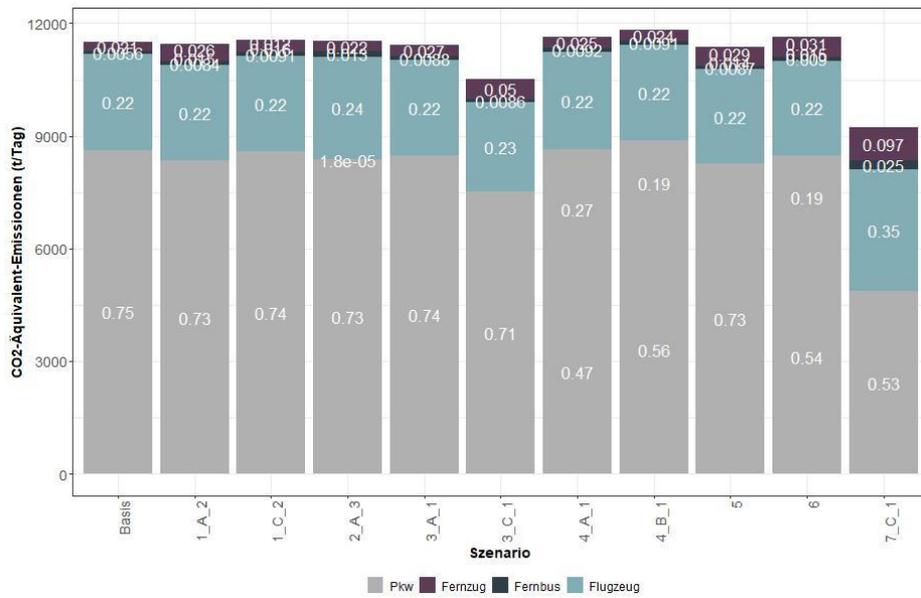


**Bild 5-15. Vergleich von CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub> Emissionen und Feinstaub**

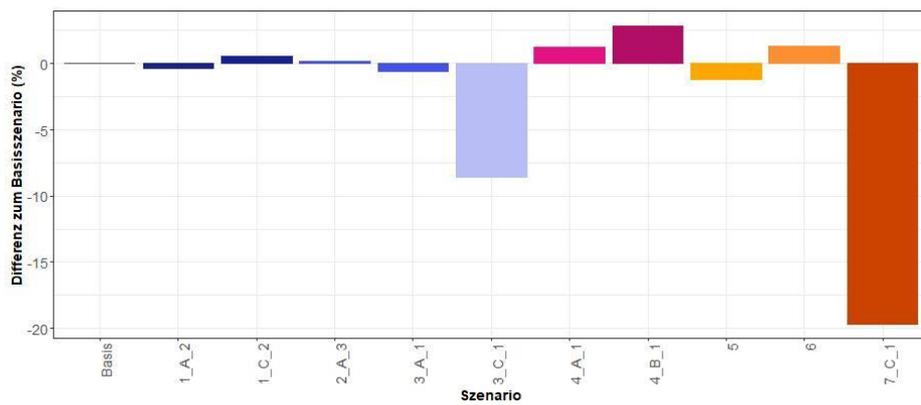
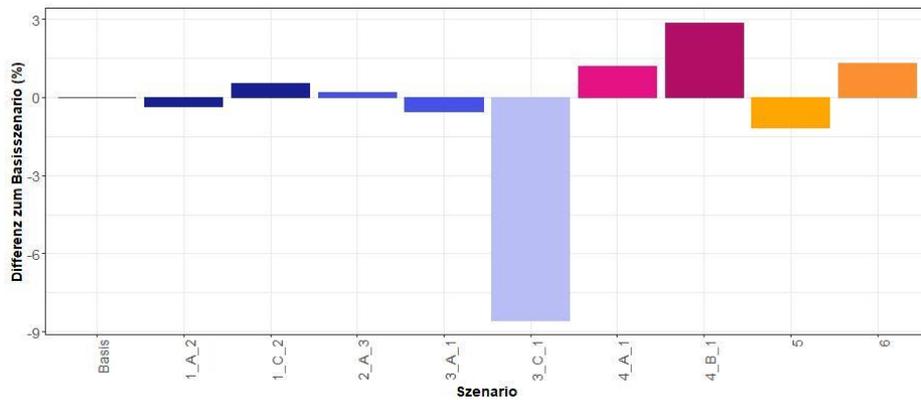
In Bezug auf der CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen, die für alle Verkehrsmittel berechnet wurde, wird die stärkste Verringerung in Szenario 7\_C\_1 und 3\_C\_1 erreicht, während der stärkste Anstieg in den Szenarien 4\_A\_1 und 4\_B\_1 beobachtet werden kann (Bild 5-16). Die Differenzwerte der Emissionen in Bezug auf das Basisszenario werden in Bild 5-17 dargestellt. Der PKW ist in allen Szenarien der Hauptverursacher mit 71% bis 75% der täglichen Gesamtemissionen aller Fernverkehrsmittel (Bild 5-16), mit Ausnahme von Szenario 7, bei dem die Emissionen 53% betragen. Die Emissionen aus dem Flugverkehr belaufen sich in den Szenarien 1 bis 6 auf 22% bis 24% der Gesamtemissionen. Dieser Wert steigt auf 35% in Szenario 7. Fernbus und Fernzug verursachen deutlich weniger CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen: der Anteil des Fernzuges liegt zwischen 2,1% und 5,0% und der des Fernbusses zwischen 0,6% und 1,3% in den Szenarien 1 bis 6. Durch den höheren Modal Split-Anteil der Fernbus und Fernzug in Szenario 7 stieg ihr CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen Anteil jedoch auf 2–6%.

Formatiert: Deutsch (Deutschland)



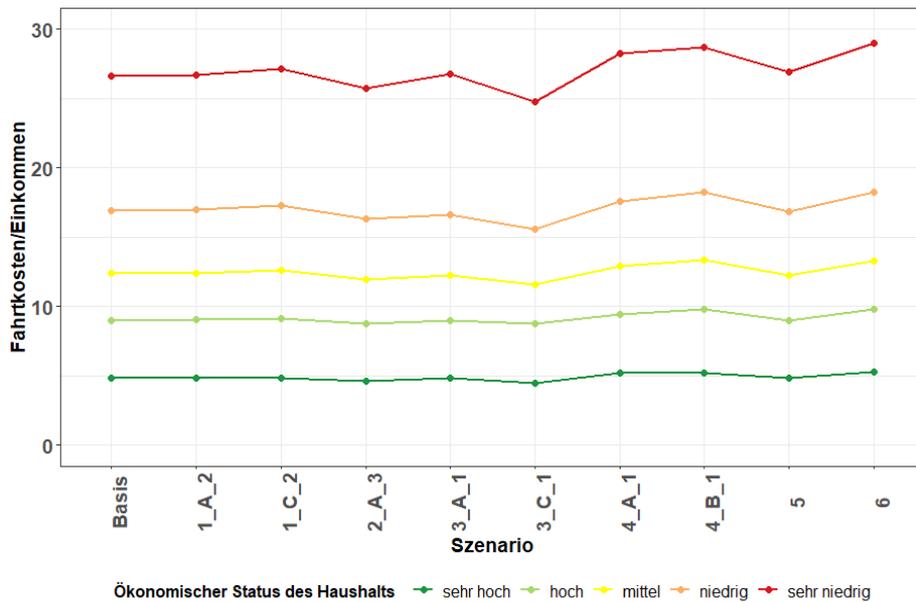


**Bild 5-16. Vergleich der CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen**



**Bild 5-17. CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen – Differenz zum Basisszenario**

Schließlich lässt sich feststellen, dass die finanzielle Belastung für Haushalte mit sehr niedrigem sozioökonomischem Status erheblich variiert, aber für Haushalte mit sehr hohem sozioökonomischem Status kaum beeinflusst wird (Bild 5-18). Dieser Unterschied ist bei dem Szenario 7\_C\_1 größer. Die höchste Reduktion der Reisekosten unter allen Haushaltsgruppen wird in Szenario 3\_C\_1 erreicht, wo die Fernzugreisezeiten um 50% reduziert werden.



**Bild 5-18. Finanzielle Belastung von Haushalten nach Einkommensgruppen**

### 4375.71.4.1. Einschätzung der Modelle

Beide Modelle basieren auf einer synthetischen Bevölkerung. Die Erstellung der Bevölkerung war ein komplexer Prozess. Die Datenerhebung, die Optimierung und die Stichprobenentnahme wurden in Kapitel 3.1.2 beschrieben. Diese Prozesse sind sehr aufwendig, müssen aber nur einmal durchgeführt werden.

Das agentenbasierte Verkehrsmodell bietet eine sehr feine Auflösung. Deswegen sind lange Laufzeiten zu erwarten. Das Nahverkehrsmodell braucht ca. 2 Stunden, um 100% der Nachfrage zu generieren. Dieselbe Zeit gilt für das Fernverkehrsmodell. Zudem muss die Verkehrsumlegung in MATSim durchgeführt werden. In diesem Projekt wurde die Nachfrage und die Kapazität in der Verkehrsumlegung auf 1% skaliert (wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben ist). Damit braucht die Verkehrsumlegung ca. 6 Stunden. Insgesamt ist die Laufzeit dieser Konfiguration 10 Stunden (eine 16-Kernel Workstation wurde verwendet).

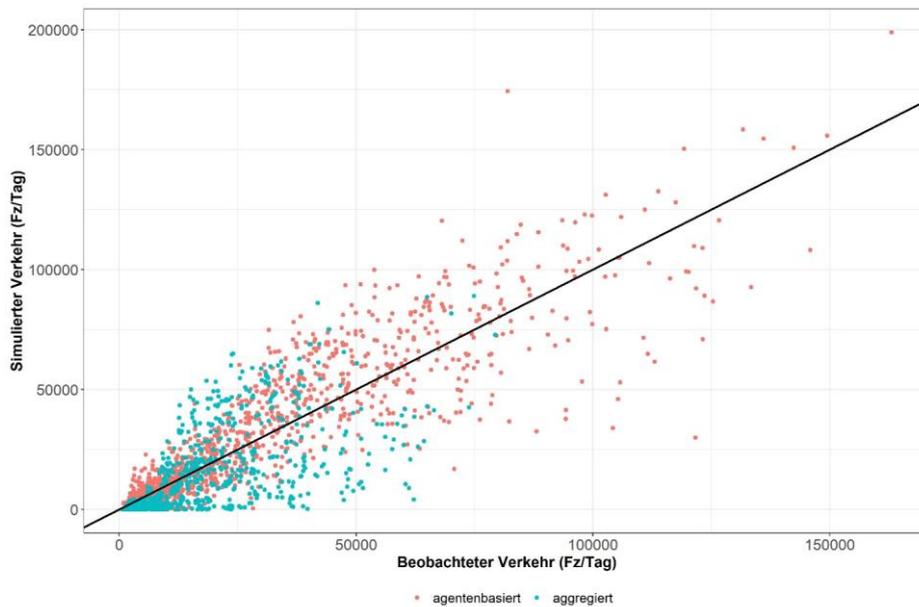
Ein Vorteil des agentenbasierten Modells ist, dass die Nachfragegenerierung skaliert werden kann (entweder Nah- oder Fernverkehr oder beide). Die Skalierung reduziert die Laufzeit, aber erhöht die

Wahrscheinlichkeit, statistisches Rauschen zu finden. In diesem Projekt wurde eine Skalierung von MITO und des Fernverkehrsmodells auf 5% getestet. Das ermöglicht schnellere Tests der Szenarien (ca. 20 Minuten pro Szenario, weniger als 7 Stunden bis zu der Verkehrsumlegung). Mit 5% sind die Ergebnisse der Nachfragegenerierung dieselben im Vergleich zu 100% der Nachfrage (mindestens in Bezug auf grobe deutschlandweite Indikatoren). Eine Skalierung der Umlegung auf unter 1% wird nicht empfohlen, da das Verkehrsaufkommen auf leicht belasteten Straßen nicht genau dargestellt werden kann.

Das aggregierte Modell ist zwar im Vergleich zum agentenbasierten stark vereinfacht, dennoch bedarf es auch eines großen Rechenaufwandes, da der gesamte deutsche Fernverkehr betrachtet wird. Das Pre-Processing, indem alle Fernfahrten zeitlich und räumlich aggregiert werden und, wie in Kapitel 3.3 erläutert, OSRM und OTP angewendet werden, dauert mit einem Rechner mit sechs Kernen für 100% der Nachfragedaten ca. 40 Stunden. Dieser Prozess muss allerdings nur einmalig durchgeführt werden.

Auch das aggregierte Modell nutzt eine Simulation für die Umlegung des Verkehrs. Somit können die korrekten Reisezeiten ermittelt werden, wenn sich der Verkehr auf einigen Abschnitten staut. Ein Durchlauf mit der Simulationssoftware SUMO benötigt ca. 8 Stunden. Auch hier wurde ein 6-Kerne Rechner verwendet und 100% Nachfragedaten. Das ist vergleichbar zu der Laufzeit des agentenbasierten Modells mit 1% der Nachfrage in der Verkehrsumlegung.

Wie erwartet, führte die höhere Detailgenauigkeit der mikroskopischen Parameter im Modell und die höhere räumliche Auflösung des agentenbasierten Modells zu geringeren Differenzen von den beobachteten Zählungen. Insbesondere beginnen und enden die Fahrten in dem aggregierten Modell nicht an einem bestimmten Ort, sondern werden in den entsprechenden Zonen eines größeren Netzes aggregiert.



**Bild 4-1149. Validierung der Verkehrsumlegung mit dem Vergleich zu beobachteten Verkehrszählungen (Vergleich beider Modelle)**

In Bezug auf Modellfähigkeiten ist das agentenbasierte Modell flexibler. Es kann mehrere Szenarien implementieren (wie z.B. Mautstraßen nur auf bestimmten Straßentypen und die Möglichkeit, die Maut zu vermeiden) aber es benötigt zusätzliche Eingabedaten und weitere Modellannahmen. Das aggregierte Modell vereinfacht auch die Definition von Szenarien und damit die notwendigen Daten und Annahmen (z.B. Maut auf allen Straßen, die Fahrer nicht vermeiden können).

Aufgrund dieser Merkmale und Anforderungen kann ein einzelnes Modell nicht empfohlen werden. Das aggregierte Modell ist für vereinfachte Szenarien geeignet (z.B. Verbesserung der Reisezeit des öffentlichen Verkehrs). Ein klarer Vorteil ist, dass die Verkehrsumlegung 100% der Nachfrage simuliert. Im Gegensatz dazu sollten komplexere Szenarien, die eine Analyse der Verkehrsverhalten auf individuelle Ebene brauchen (z.B. die Entscheidung, die Maut zu vermeiden oder auf Mautstraßen fahren, die vom Haushaltseinkommen abhängig ist) mit dem agentenbasierten Modell simuliert werden. Die feine Auflösung des Modells ermöglicht auch die detaillierte Analyse der Ergebnisse und damit die Berechnung von einer breiteren Auswahl von Indikatoren.

## 4375.72.4.2. Limitationen und Ausblick

Modelle können immer nur eine vereinfachte Abbildung der Realität sein. Einige Aspekte sind auch in den hier entwickelten Modellen unvollständig oder nicht dargestellt. Dies betrifft beispielsweise die Modellierung des Fernbusnetzes. Als Grundlage wurden dafür die öffentlich verfügbaren Daten von Flixbus verwendet. Diese Informationen sind in GTFS und OTP vorhanden, allerdings nicht immer vollständig. Auch andere Anbieter als Flixbus und BlaBlaBus wurden nicht berücksichtigt mit dem aggregierten Modell.

Im aggregierten Modell wurde das Simulationswerkzeug SUMO verwendet. Um die Simulation handhabbar zu halten, wurde hier nur das übergeordnete Straßennetz der deutschen Fernstraßeninfrastruktur modelliert. So wurde das Ziel dieses Projektes erreicht, mit einem zweiten, vereinfachten Modell die Ergebnisse zu überprüfen. Allerdings bringt solch ein vereinfachtes Modell auch Nachteile mit sich. Auf das Straßennetz bezogen ist es beispielsweise denkbar, dass Fahrzeuge über Routen fahren, die nicht unbedingt sinnvoll für eine bestimmte Verbindung sind. Günstigere, kürze Routen könnten beispielsweise gefunden werden, wenn für Teile der Reise auch das untergeordnete Netz verwendet werden dürfte. Da dieses aber im SUMO Modell nicht vorhanden ist, können die Fahrzeuge dies auch nicht nutzen. Manche Fahrten sind daher evtl. unnötig lang oder beinhalten Umwege. Ebenso verhält es sich mit Fahrten im öffentlichen Personennahverkehr, der im aggregierten Modell nicht detailliert abgebildet ist. Insbesondere die Betrachtung der Zu- und Abfahrten zu den Haltestellen des Fernverkehrsnetzes können daher nicht genau analysiert werden.

Eine weitere Vereinfachung, die im aggregierten Modell vorgenommen wurde, bezieht sich auf die Abfahrtszeitpunkte der Fahrten. Diese Zeitpunkte sind im aggregierten Modell nicht so fein aufgelöst wie im agentenbasierten Modell dargestellt, sondern werden ebenfalls aggregiert. Für Bahn- und Busfahrten werden je nach Tageszeit mehrere Stunden aggregiert, Autofahren werden stündlich aggregiert. Diese Aggregation macht es unmöglich, manche Stausituationen zu analysieren.

Im Verkehrsmittelwahlmodell wurden mangels Daten zur Kalibrierung des Modells und zur Vereinfachung des Modells nur die Modellparameter Reisezeit und Kosten integriert. Eine Betrachtung zusätzlicher Faktoren, wie beispielsweise verschiedene Wert der Zeit beim Warten oder Übertragen oder Aspekte wie der Komfort und die Sicherheit des Verkehrsmittels wären ebenfalls wünschenswert. Dies bedarf allerdings einen zusätzlichen Mehraufwand in der Kalibrierung. Auf Grund der zuvor bereits genannten Einschränkungen, ist es im Verkehrsmittelwahlmodell auch nicht möglich, gewisse Entscheidungen, wie beispielsweise der

Änderung der Abfahrtszeit um Wartezeiten an Haltestellen zu verhindern oder nicht in die Spitzenstunden des MIV zu geraten, abzubilden.

Die Verwendung eines agentenbasierten Modells ermöglicht einige dieser Einschränkungen zu überwinden, allerdings mit einer höheren Laufzeit. Aufgrund der hohen Laufzeit des agentenbasierten Modells musste die Verkehrsumlegung in MATSim mit kleinen Maßstäben arbeiten. Dies könnte die Zuverlässigkeit (und die Stabilität der Ergebnisse von verschiedenen Modellsimulationen) der Verkehrsströme auf Straßen mit geringen Verkehrsstärken beeinträchtigen.

Das Straßennetz ist immer noch recht grob in der Auflösung. Selbst wenn im Vergleich zum aggregierten Modus viel mehr Kanten hinzugefügt wurden, fehlen noch viele lokalen Straßen. Deswegen werden Bundesstraßen tendenziell als mehr überlastet dargestellt als sie in Wirklichkeit sind. Aus diesem Grund mussten wir zur Vereinfachung die Anzahl der Kurzstreckenfahrten reduzieren, was diese Limitierung der begrenzten Auflösung ausgleichen sollte.

Die Wahl der Abfahrtszeitpunkte konnte mit dem agentenbasierten Modell mit einer sehr feinen Auflösung simuliert werden. Allerdings sind die Modellannahmen so angelegt, dass Änderungen der Abfahrtszeiten als Reaktion auf die implementierten Szenarien nicht möglich sind. Die Verlagerung von Fahrten von der Hauptverkehrszeit auf andere Tageszeiten wurde nicht abgebildet.

In Bezug auf das Verkehrsmittelwahlmodell berücksichtigt das agentenbasierte Modell zusätzliche soziodemografische Faktoren wie Einkommen, Alter oder Geschlecht der Reisenden. Trotzdem enthält das Modell noch keine anderen relevanten Eigenschaften öffentlicher Verkehrsdienste wie Komfort oder Zuverlässigkeit. Gezielte Befragungen (statt Haushaltsbefragungen wie MiD) könnten die Modelle und damit ihre Fähigkeit zur Darstellung von Szenarien wie dem Deutschlandtakt verbessern.

Schließlich vereinfacht das Modell einige der Szenarien aufgrund fehlender Daten oder aufgrund von Berechnungserfordernissen. Zum Beispiel sind die Alternativen „Maut annehmen“ und „Maut vermeiden“ exklusiv, was bedeutet, dass es nicht möglich ist, dass ein Fahrer sich für eine Mautstraße entscheidet und in einer späteren Phase der Fahrt davon abweicht (z. B. wenn die Verkehrsstärken geringer sind). Eine weitere Vereinfachung wird in Bezug auf die Ridepooling-Dienste vorgenommen. Die Modellierung von Ridepooling-Diensten erst in den Kinderschuhen steckt, und erst wenige Ansätze bestehen (FRIEDRICH et al., 2019). Dadurch könnten die Wartezeiten und Betriebsgeschwindigkeiten über- oder unterschätzt werden. Im aggregierten

Modell wird nicht zwischen Autobahnen und Bundesstraßen unterschieden, da der Rechenaufwand ansonsten zu hoch wäre. Aus diesem Grund werden in Szenario 4 nur die Varianten berücksichtigt, in denen die Maut für beide Straßentypen erhoben wird. Im Modell wird die Maut auf die gesamte Strecke im Straßennetz aufgeschlagen.

Die in Forschungsumgebungen entwickelten agentenbasierten Modelle bieten zwar Werkzeuge und Methoden, um die meisten dieser Vereinfachungen zu überwinden, ihre Integration in das deutschlandweite Modell war jedoch aufgrund der Laufzeiten, des Speicherbedarfs oder aufgrund der zu groben Auflösung des Netzes und des Zonensystems nicht möglich. Die Verwendung des deutschlandweiten Modells stellt einen guten Rahmen dar, um die Verkehrsnachfrage in großen Gebieten zu generieren. Teilbereiche des Untersuchungsgebiets können aus einem solchen großräumigen Modell extrahiert werden, um Korridor- oder lokale Studien durchzuführen. Damit wäre es möglich, den Detaillierungsgrad der Teilsimulationen noch weiter zu erhöhen.

### 4375.73-4.3. Handlungsempfehlungen

Zusammenfassend lassen sich folgende Handlungsempfehlungen aus der Untersuchung ableiten:

- ~~• Der Deutschlandtakt ist eine gute Maßnahme, um Reisen mit der Bahn angenehmer zu machen. Weil sich die Gesamtreisezeit auf den meisten Strecken aber nur geringfügig (in manchen Fällen gar nicht) verkürzt, sind die Auswirkungen des Deutschlandtakts auf den Autoverkehr marginal. Weniger als 1,5 Prozentpunkte verlagern sich vom Auto auf den Bahnfernverkehr.~~
- ~~• Würde es gelingen, die Reisezeiten mit der Bahn zu halbieren, so würde die Zahl der Bahnfahrten verdoppelt und der PKW Fernverkehr um knapp 9 Prozentpunkte sinken.~~
- ~~• Eine Autobahnmaut würde Autobahnen entlasten, aber auch zu einer Verlagerung des Verkehrs auf nichtbemaute Straßen führen. Der Umstieg vom Auto auf Bus und Bahn nach Einführung einer Autobahnmaut findet kaum statt. Bei einer Maut von 5 Cent/km auf Autobahnen und Bundesstraßen reduziert sich der PKW Anteil an allen Fernfahrten von 77,6% auf 76,0%.~~
- ~~• Gebühren pro gefahrenen Kilometer verlagern die Verkehrsnachfrage vom Auto auf andere Verkehrsmittel effektiv. Bei geringeren Gebühren (20 Cent pro gefahrenen Kilometer) werden nur 3,8 Prozentpunkte vom Auto auf andere Fernverkehrsmittel verlagert. Bei sehr hohen Gebühren (2 € pro km) verringert sich der Autoanteil auf Fernfahrten um 43 Prozentpunkte und sinkt auf lediglich 35% des Modalsplits. Nicht untersucht wurden jedoch die sozialen Auswirkungen solch massiver Verteuerungen des PKW, vor allem im ländlichen Raum wo alternative Reisemöglichkeiten häufig begrenzt sind.~~

- Der Personenfernverkehr macht derzeit 17% der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Deutschlands Straßen aus. Der Personennahverkehr trägt 27% und der Güterverkehr 56% der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs bei. Alle drei Sektoren müssen ihren Beitrag zur Reduktion von Emissionen leisten.

Neben diesen kurz zusammengefassten Handlungsempfehlungen werden im Folgenden wichtige Schlussfolgerungen gezogen und Handlungsempfehlungen näher erläutert.

Laut Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2030 ist das Kernanliegen für das deutsche Verkehrsnetz „der Erhalt der Bestandsnetze und die Beseitigung von Engpässen auf Hauptachsen und in wichtigen Verkehrsknoten“. Die konkreten Ziele beinhalten demnach die Reduktion der Staus auf den Bundesfernstraßen und die Steigerung der Kapazität im Personen- und Güterverkehr auf der Schiene. In letzterem Punkt orientiert sich der BVWP am Deutschland-Takt und legt infrastrukturelle Aus- und Neubaumaßnahmen für dessen Einführung fest. Ziel des Projektes Deutschland-Takt im Bahnverkehr ist es, durch einen abgestimmten Fahrplan und Ausbaumaßnahmen, Fahr- und Umsteigezeiten zu verringern und den Bahnverkehr attraktiver für viele Personen zu machen.

Die Ergebnisse zeigen, dass isolierte Maßnahmen zur Erhöhung des Bahn- und/oder Busanteils oder zur Verringerung des Autoverkehrs möglicherweise nicht ausreichen, um die Ziele für den Modal Split und gegen die Verkehrsüberlastung zu erreichen. Nur ein extremes Deutschland-Takt-Szenario, in dem die Reisezeiten halbiert wurden, könnte die Zahl der Fahrgäste im Schienenverkehr effektiv verdoppeln und den Anteil des PKW-Verkehrs um 8,8 Prozentpunkte senken. Eine Verdopplung der Bahngeschwindigkeit im Fernverkehr erscheint technisch und wirtschaftlich nicht machbar. Laut Modell wäre die nächst effizienteste Option zur Entlastung des Bundesfernstraßennetzes die Kombination von Verbesserungen im Verkehrswesen (Pull-Maßnahmen) und Mautgebühren (Push-Maßnahmen). Die Kombination aller Pull- und Push-Maßnahmen konnte den Anteil des PKW-Verkehrs um 3,9 Prozentpunkte und die überlasteten Autobahnen mit einer Auslastung von über 50% in der Spitzenstunde um 6,1 Prozentpunkte reduzieren. Die Reduktion der Verkehrsbelastung auf dem Bundesfernstraßennetz würde auf Kosten der anderen Straßen gehen: im Modell wurde ein signifikanter Anstieg des PKW-Verkehrs auf anderen Straßen festgestellt, wo eine 42,5% größerer Fahrtleistung und 75,2% höheren Reisezeiten im Modell beobachtet wurden. Auch wenn die durchschnittliche Mehrbelastung auf anderen Straßen akzeptabel sein mag, so könnte sie lokal zu erheblichen Staus führen. Dies kann zu einer Verlagerung der Engpässe vom Bundesfernstraßennetz auf das lokale Straßennetz führen. Um dies zu verhindern, wäre ein integrierter Ansatz zwischen den Bundesverkehrsstraßen und

untergeordneten Straßen notwendig, was möglicherweise durch eine Gebühr je gefahrenen Kilometer erreicht werden könnte.

Die Ergebnisse der entwickelten Modelle können als Eingabedaten für detailliertere Studien dienen, in denen die betrieblichen Auswirkungen der Maßnahmen auf bestimmte Untersuchungsgebiete abgeschätzt werden. Dies ist insbesondere zu empfehlen in den Regionen, in denen die hier vorgestellten Modelle erheblichen Verkehrsstau im Mautszenario zeigen.

Eine Reduktion des PKW-Anteils bei der Verkehrsmittelwahl und eine Reduktion der Überlastung auf den Autobahnen und Bundesstraßen führen nicht zwangsläufig zu einer Verringerung der Tagesfahrleistungen und der Verkehrsemissionen. Damit werden Klimaschutzziele nicht automatisch erreicht, wenn eine Mautgebühr auf Bundesstraßen erhoben wird. Die Nationale Plattform Zukunft der Mobilität formuliert unter anderem das Zukunftsziel eines "weitgehend treibhausgasneutralen und umweltfreundlichen Verkehrssystems". Im Klimaschutzplan 2050 sind konkrete Zielwerte für die verschiedenen Sektoren bzgl. der Senkung von Emissionen für das Zieljahr 2030 festgelegt. Der Sektor Verkehr soll mit 42% zum Klimaziel 2030 beitragen. Das bedeutet, dass die Emissionen in Bezug zum Vergleichsjahr 1990 um diesen Prozentwert reduziert werden sollen. Konkret bedeutet dies einen Ausstoß von maximal 85 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-äquivalenten im Jahr 2030.

Das Szenario, das Mautgebühren mit einer Verbesserung des öffentlichen Verkehrs untersucht, hat gezeigt, dass die Emissionen im Bundesstraßennetz um 23% gesenkt werden können, dies aber auf Kosten eines Anstiegs der Emissionen auf anderen Straßen geht. Insgesamt bleiben die CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen auf einem ähnlichen Niveau wie im Basisszenario oder steigen sogar leicht an, wie im kombinierten Szenario aller untersuchten Maßnahmen. In diesem kombinierten Szenario wird der Verkehr auf dem Bundesstraßennetz zwar reduziert. Die Einführung des bedarfsgesteuerten Ridepoolings zur Schiene ersetzt auch lange Autofahrten durch kurze Fahrten mit dem Ridepooling. Trotzdem produzieren die Umwege der Autofahrer, die Mautgebühren vermeiden, und die zunehmende Anzahl Flugreisender zusätzliche Emissionen. Daher könnten weitere Maßnahmen, die die Betriebskosten des Autos beeinflussen, wirksamer sein, um den gesamten Autoverkehr zu reduzieren. In diesem Projekt haben wir ein zusätzliches Szenario getestet, bei dem die Betriebskosten für Autos von 0,08 €/km auf 0,50 €/km erhöht wurden. Der Anteil des PKW-Verkehrs wird in einer ähnlichen Größenordnung reduziert wie beim extremen Deutschlandtakt-Szenario, und es wird geschätzt, dass die Verkehrsemissionen in ähnlicher Größenordnung (um 8,5 Prozentpunkte) reduziert werden können. Eine Erhöhung dieser Kosten

auf 1€/km kann sogar den Autoanteil um 23 Prozentpunkte auf 58% des Modalsplits reduzieren. Solch erhebliche Kosten für Autofahrten könnte jedoch Fragen der gleichwertigen Lebensbedingungen aufwerfen, vor allem für Menschen in ländlichen Regionen, in denen traditionell die Autoabhängigkeit größer ist, und von Menschen mit niedrigem Einkommen, deren Mobilitätsoptionen deutlich gravierender eingeschränkt würden als für Personen mit hohem Einkommen.

Außerdem sollten zusätzliche Maßnahmen in Betracht gezogen werden, um die Emissionen des Fernverkehrs zu verringern. Dies kann beispielsweise der Ausbau von Strecken und/oder Haltestellen sein, um den Zugang zu Fernverkehrszügen und -bussen in ländlicheren Gebieten zu verbessern, die Anwendung von Beschränkungen für den Inlandsflugverkehr oder die Ersetzung von kraftstoffbetriebenen Fahrzeugen durch Elektrofahrzeuge. Die Elektrifizierung der Fahrzeuge kann einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der Verkehrsemissionen darstellen. Wenn der Strom allerdings überwiegend durch fossile Brennstoffe generiert wird, ist die Reduktion der klimaschädlichen Treibhausgase gering. Ferner muss berücksichtigt werden, dass Elektrofahrzeuge weiterhin Feinstaubemissionen am Fahrzeug generieren (durch Reifenabrieb und Abrieb der Bremsbeläge), und dass die Lärmbelastung ab 30 km/h gleichwertig mit der Lärmerzeugung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ist, weil die Abrollgeräusche der Reifen größer sind als die Motorgeräusche.

Auf der anderen Seite verursacht der Nahverkehr mit dem PKW 14% der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Autobahnen und 46% auf Bundesstraßen. Zusammen mit dem Güterfernverkehr trägt er zu 77% der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Autobahnen, 85% der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Bundesstraßen und 88 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf anderen Straßen bei. Um die Gesamtemissionen des Verkehrs wirksam zu reduzieren, muss der Nahverkehr entsprechend einen wichtigen Beitrag leisten. Zusätzlich zu den Maßnahmen für den Fernverkehr können auch im Nahverkehr durch die Förderung aktiver Verkehrsträger (Radfahren, Zufußgehen), die Verbesserung des Angebots im öffentlichen Nahverkehr, um mehr alternative Strecken anzubieten, und/oder die Einführung von Abrufdiensten und Mikromobilität Alternativen zum PKW geschaffen werden. Diese Maßnahmen könnten in Kombination mit Maßnahmen für den Fernverkehr zu Synergien führen, die den Anteil des PKW-Verkehrs auf stadtnahen Autobahnen deutlich verringern. Sie könnten auch dazu beitragen, den Verkehr von anderen Straßen zu entlasten, die von der Mauterhebung im Bundesnetz betroffen waren. Die entwickelten Modelle könnten zur Generierung von Eingabedaten für Detailstudien in großen Ballungsräumen verwendet werden, die die Auswirkungen von Fern- und Nahverkehrsmaßnahmen kombinieren.

Durch die Pandemie konnte man in den Jahren 2020 und 2021 beobachten, wie sich die Lebensbedingungen und das Reiseverhalten ändern könnten, wenn strengere Mobilitätsbeschränkungen vorgeschrieben werden. Während des Höhepunkts der Pandemie haben die Beschränkungen die Verkehrsüberlastung wirksam reduziert, Fernreisen reduziert und/oder verkürzt, und die Emissionen sanken auf ein Niveau sogar leicht unterhalb der Zielwerte. Auch wenn restriktive Maßnahmen in naher Zukunft vielleicht nicht mehr angewandt werden, zeigt diese Erfahrung, dass Maßnahmen das Reiseverhalten und Verkehrsaufkommen verändern können. Verkehrsstaus und Emissionen sind also nicht unausweichlich, sondern können durch entsprechende regulative Maßnahmen reduziert werden. Die Einschränkungen der Pandemie waren sicherlich erheblich, und Modelle wie diese, die hier vorgestellt wurden, können helfen, Maßnahmen zu finden, die effektiv sind, ohne die Mobilität der Bevölkerung zu massiv einzuschränken.

In der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität werden zusätzlich zu den zuvor genannten Zielen auch soziale Ziele für den Verkehrsbereich formuliert. So soll nicht nur eine effiziente, hochwertige und flexible, sondern auch sichere und bezahlbare Mobilität ermöglicht werden. Des Weiteren soll das System resilient und für alle verfügbar sein.

Obwohl es mit den getesteten Maßnahmen schwierig ist, die oben genannten Emissionsziele zu erreichen, gibt es einige Hinweise darauf, welche Maßnahmen weiter untersucht werden sollten. So ist beispielsweise nicht damit zu rechnen, dass Änderungen bei der Bus-Mehrwertsteuer zu einer wesentlichen Verlagerung der Reisenden vom Auto führen, und nur extreme Änderungen bei der allgemeinen Reisezeit im Schienenverkehr könnten dazu führen, dass sich die Zahl der Bahnreisenden deutlich erhöht. Die Anwendung der Maut auf das Bundesstraßennetz reduzierte zwar den Autoanteil effektiver, verlagerte aber die Verkehrs- und Stau-Probleme zum Teil auf das lokale Verkehrsnetz. Die Kombination dieser Maßnahme mit Verbesserungen im öffentlichen Verkehr verringerte den Anstieg der Emissionen und die Ungleichheit zwischen Haushalten mit hohem und niedrigem sozioökonomischem Status und milderte so die negativen Folgen der Mauterhebung ab. Es besteht jedoch noch Potenzial für eine weitere Senkung der Emissionswerte durch andere Maßnahmen für den Fernverkehr, z. B. Beschränkungen für den Flugverkehr oder höhere Kfz-Betriebskosten, sowie durch die Kombination mit Maßnahmen für den Nahverkehr.

## 4376-5. Literaturverzeichnis

- ABERLE, C. 2020. Who Benefits from Mobility as a Service? A GIS-Based Investigation of the Population Served by Four Ride-Pooling Schemes in Hamburg, Germany. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, 70, 25 - 33. doi:<https://doi.org/10.1007/s42489-020-00041-4>
- ADAC. 2020. *Maut: Autobahnen, City-Maut, Umweltzonen*. <https://www.adac.de/reise-freizeit/europas-strassen/maut-vignette/>.
- . 2010. *PKW-Maut in Deutschland?* [https://tumtp20.bivb.de/TouchPoint/singleHit.do?methodToCall=showHitundcurPos=1undidentifier=2\\_SOLR\\_SERVER\\_417316790undtab=showTitleActive](https://tumtp20.bivb.de/TouchPoint/singleHit.do?methodToCall=showHitundcurPos=1undidentifier=2_SOLR_SERVER_417316790undtab=showTitleActive).
- ALONSO-MORA, J., SAMARANAYAKE, S., WALLAR, A., FRAZZOLI, E., und RUS, D. 2017. On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(3), 462 - 467. doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.1611675114>
- BEN-AKIVA, E. MOSCHE. 1973. *Structure of passenger travel demand models*. Massachusetts Institute of Technology.
- BISCHOFF, J., und MACIEJEWSKI, M. 2020. Proactive empty vehicle rebalancing for Demand Responsive Transport services. *Procedia Computer Science*, 170, 739 - 744. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.162>
- BRACHER, B., und K. BOGENBERGER. 2017. „A dynamic pricing scheme for a congestion charging zone based on a network fundamental diagram.“ *5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*. Naples. 669 - 674.
- Bundesanstalt für Straßenwesen. 2011. „Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen“. [https://www.bast.de/BAST\\_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/zaehl\\_node.html](https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/zaehl_node.html)
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. 2014. „Verkehrsverflechtungsprognose 2030.“ <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030.html>
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. 2017. „Mobilität in Deutschland.“ Bonn. <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/>.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. 2021. „Infrastruktur für einen Deutschland-Takt im Schienenverkehr“. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/BVWP/bundesverkehrswegeplan-2030-deutschlandtakt.html>
- Center for Environmental Excellence by AASHTO. 2020. *Traffic Noise and Transportation*. Retrieved from <https://environment.transportation.org/education/environmental-topics/traffic-noise/traffic-noise-overview/>

- CLEWLOW, R. R., und MISHRA, G. S. 2017. *Disruptive Transportation: The Adoption, Utilization, and Impacts of Ride-Hailing in the United States*. Davis: Institute of Transportation Studies. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/82w2z91j>
- DANDL, F., M. HYLAND, K. BOGENBERGER, und HANI MAHMASSANI. 2019. „Evaluating the impact of spatio-temporal demand forecast aggregation on the operational performance of shared autonomous mobility fleets.“ *Transportation* 114.
- DANDL, F., und K. BOGENBERGER. 2019. „Comparing Future Autonomous Electric Taxis With an Existing Free-Floating Carsharing System.“ *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.* 26 (6): 2037 - 2047.
- door2door. 2018. *From roadside assistance to mobility provider: ADAC x door2door*. Retrieved from <https://door2door.io/en/references/reference-project-allygator/>
- ENGELHARDT, R., F. DANDL, A. BILALI, und K. BOGENBERGER. 2019. „Quantifying the Benefits of Autonomous On-Demand Ride-Pooling: A Simulation Study for Munich, Germany.“ *IEEE ITSC*.
- European Commission. 2021. Number of trips by country / world region of destination (TOUR\_DEM\_TTW ). Eurostat Data Browser. <https://ec.europa.eu/eurostat/en/>
- FRIEDRICH, M., RICHTER, E., SONNLEITNER, M. 2019. Modellierung der Nachfragewirkungen von automatisierten Verkehrsmitteln und Mobilitätsdiensten. In: *Straßenverkehrstechnik* 04/2019. Kirschbaum Verlag GmbH.
- GREENBLATT, J. B., und SAXENA, S. 2015. Autonomous taxis could greatly reduce greenhouse-gas emissions of US light-duty vehicles. *Nature Climate Change*, 5, 860 - 863. doi:<https://doi.org/10.1038/nclimate2685>
- GRIFFIN, G.P., und I.N. SENER. 2016. „Planning for Bike Share Connectivity to Rail Transit.“ *Journal of Public Transportation* 19.
- HAHN, W. 2000. „Interdependenzen zwischen den Verkehrsträgern Straße und Schiene - ein vernachlässigtes Feld der Bundesverkehrswegeplanung?“ *Straßenverkehrstechnik* 6 (44).
- HARDT, C., und K. BOGENBERGER. 2018. „Analysis of Demand Patterns and Availability in Free-Floating Carsharing Systems.“ *21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*,. 1186 - 1193.
- HARRER, B., und S. SCHERR. 2014. *Tagesreisen der Deutschen*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- HORNI, A., K. NAGEL, und K.W. AXHAUSEN. 2016. *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. London: Ubiquity Press.
- HÜLSMANN, F., GERIKE, R., KICKHÖFER, B., NAGEL, K., und R. LUZ, R. 2011. „Towards a multi-agent based modelling approach for air pollutants in urban regions.“, in *Luftqualität an Straßen*, Bundesanstalt für Straßenwesen, FGSV Verlag GmbH, Bergisch Gladbach, 2011, 144–166.
- ioki inspiring smart mobility. 2021. *Working today on the mobility of tomorrow*. Retrieved from <https://ioki.com/en/about-ioki/>

- I. KADDOURA, L. KROEGER, und K. NAGEL. 2016a. „User-specific and dynamic internalization of road traffic noise exposures.“. *Networks and Spatial Economics*, 2016. DOI: 10.1007/s11067-016-9321-2.
- I. KADDOURA und K. NAGEL. 2016b. „Activity-based computation of marginal noise exposure costs: Implications for traffic management.“. *Transportation Research Record 2597*, 2016. DOI: 10.3141/2597-15.
- KESSLER, L., B. KARL, und K. BOGENBERGER. 2019. „Spatiotemporal Traffic Speed Reconstruction from Travel Time Measurements Using Bluetooth Detection“ *IEEE ITSC*.
- KESSLER, L., G. HUBER, A. KESTING, und K. BOGENBERGER. 2018. „Comparing Speed Data from Stationary Detectors Against Floating-Car Data.“ *15th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems*,. 299 - 304.
- KOPPELMAN, F.S. 1983. „Predicting Transit Ridership in Response to Transit Service Changes.“ *Journal of Transportation Engineering* 109 (4): 548 - 564.
- KÖNIG, A., BONUS, T., und GRIPPENKOVEN, J. 2018. Analyzing Urban Residents' Appraisal of Ridepooling Service Attributes with Conjoint Analysis. *Sustainability*, 10(10)(3711). doi:https://doi.org/10.3390/su10103711
- LEICH, G., und BISCHOFF, J. 2019. Should autonomous shared taxis replace buses? A simulation study. *Transport Research Procedia*, 41, 450 - 460. doi:https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.09.076
- LIPPOLDT, K., T. NIELS, und K. BOGENBERGER. 2018. „Effectiveness of different incentive models in free-floating carsharing systems: A case study in Milan.“ *21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 1179 - 1185.
- LLORCA, C., J. MOLLOY, J. JI, und R. MOECKEL. 2018a. „Estimation of a Long-Distance Travel Demand Model using Trip Surveys, Location-Based Big Data, and Trip Planning Services.“ *Transportation Research Record 2672* (47): 103 - 113.
- LLORCA, C., J. MOLLOY, J. JI, und R. MOECKEL. 2018b. „The usage of location based big data and trip planning services for the estimation of a long-distance travel demand model. Predicting the impacts of a new high speed rail corridor.“ *Research in Transportation Economics* 72: 27 - 36. doi:https://doi.org/10.1016/j.retrec.2018.06.004.
- LLORCA, C., und R. MOECKEL. 2019. „Effects of scaling down the population for agent-based traffic simulations.“ *Procedia Computer Science* 151: 782 - 787. doi:https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.04.106.
- MAGDOLEN, M., L. ECKE, T. HILGERT, B. CHLOND, und P. Vortisch. 2020. „Identification of Non-Routine Tours in Everyday travel Behavior.“ *TRB*.
- MATSim. 2020. *MATSim Community*. Zugriff am 29. 06 2020. <https://matsim.org/>.
- MARTIN, L. M., und VIEGAS, J. M. 2017. Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban mobility system: An agent-based model applied to the city of Lisbon, Portugal. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(1), 13 -27. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.05.005

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

Formatiert: Deutsch (Deutschland)

- MOECKEL, R., N. KUEHNEL, C. LLORCA, A. MORENO, und H. RAYAPROLU. 2020. „Agent-Based Simulation to Improve Policy Sensitivity of Trip-Based Models.“ *Journal of Advanced Transportation*. doi:<https://doi.org/10.1155/2020/1902162>.
- MOECKEL, R., R. FUSSEL, und R. DONNELLY. 2015. „Mode choice modeling for long-distance travel.“ *Transportation Letters. The International Journal of Transportation Research* 7(1): 35 - 46.
- MOECKEL, R., und R. DONNELLY. 2011. „Nationwide Estimate of Long-Distance Travel. Generating External Trips for Local Travel Demand Models.“ *Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Transportation Research Forum (TRF)*. Long Beach CA.
- MOECKEL, R., und R. LEWIS. 2017. „Two decades of smart growth in Maryland (U.S.A): impact assessment and future directions of a national leader.“ *Urban, Planning and Transport Research* 7 (1): 22 - 37.
- MOIA. 2021. *Arrival begins here*. Retrieved from <https://www.moia.io/en>
- MORSCH, W. T., PUELLO, L. L., und GEURS, K. T. 2019. Potential uptake of adaptive transport services: An exploration of service attributes and attitudes. *Transport Policy*, 84, 1 - 11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.09.001>
- MULLAHY, J. 1986. „Specification and testing of some modified count data models.“ *Journal of Economics* 33 (3): 341 - 365. doi:[https://doi.org/10.1016/0304-4076\(86\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0304-4076(86)90002-3).
- NIELS, T., und K. BOGENBERGER. 2017. „Booking Behavior of Free-floating Car Sharing Users – Empirical Analysis of Mobile Phone App and Booking Data with Focus on BEVs.“ *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* ((2650)): 123 - 132.
- PTV Planung Transport Verkehr AG. 2016. „Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030“. [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/BVWP/bvwp-methodenhandbuch.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/BVWP/bvwp-methodenhandbuch.pdf?__blob=publicationFile)
- REISS, S., F. PAUL, und K. BOGENBERGER. 2015. „Empirical Analysis of Munich's freefloating Bike Sharing System: GPS-Booking Data and Customer Survey among Bike Sharing Users.“ *Präsentiert bei dem 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington DC, United States.
- REISS, S., und K. BOGENBERGER. 2015. „GPS-Data Analysis of Munich's Free-Floating Bike Sharing System and Application of an operator-based Relocation Strategy.“ *IEEE 18th INTERNATIONAL Conference on Intelligent Transportation Systems*.
- REMPE, F., L. KESSLER, und K. BOGENBERGER. 2017. „Fusing probe speed and flow data for robust short-term congestion front forecasts.“ *5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems*. 31 - 36. doi:10.1109/MTITS.2017.8005695.
- REMPE, F., P. FRANECK, U. FASTENRATH, und K. BOGENBERGER. 2017. „A phasebased smoothing method for accurate traffic speed estimation with floating car data.“ *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 85: 644 - 663.

- SADOWSKY, N., und E. NELSON. 2017. „The impact of ride-hailing services on public transportation use: A discontinuity regression analysis.“ *Economics Department Working Paper Series*.
- SCAHEEN, S., A. STOCKER, und M. MUNDLER. 2017. „Online and app-based carpooling in France: Analyzing users and practices—A study of BlaBlaCar.“ *Disrupting Mobility*. Springer, Cham 181 - 196.
- SCHLODER, L. 2017. *Analysis of Passenger Demand Shifts between Local Trains and Buses on the Line Munich-Nuremberg*. Master Thesis at the Technical University of Munich, advised by Rolf Moeckel.
- SCHMÖLLER, S., S. WEIKL, J. MÜLLER, und K. BOGENBERGER. 2015. „Empirical analysis of free-floating carsharing usage: The Munich and Berlin case.“ *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 56: 34 - 51.
- SHEN, Y., ZHANG, H., und ZHAO, J. 2018. Integrating shared autonomous vehicle in public transportation system: A supply-side simulation of the first-mile service in Singapore. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 113, 125 - 136. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.04.004>
- Toll Collect. 2018. *Maut auf allen Bundesstraßen erfolgreich gestartet*. 01. 07. [https://www.toll-collect.de/de/toll\\_collect/unternehmen/presse/pressemitteilungen/detailseite\\_press\\_6016.html](https://www.toll-collect.de/de/toll_collect/unternehmen/presse/pressemitteilungen/detailseite_press_6016.html).
- TRAIN, E. KENNETH. 2009. *Choice Methods with Simulation. Second Edition*. Cambridge University Press.
- TREIBER, M., A. KESTING, und R.E. WILSON. 2011. „Reconstructing the TrafficState by Fusion of Heterogeneous Data.“ *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 408 - 419.
- Umwelt Bundesamt. 2010. *PKW-MAUT IN DEUTSCHLAND? Eine umwelt- und verkehrspolitische Bewertung*. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3929.pdf>
- Umwelt Bundesamt. 2020. *Fahrleistungen, Verkehrsaufwand und „Modal Split“*. 14. 02. Zugriff am 29. 06 2020. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split>.
- Victoria Transport Policy Institute (2017). „Transportation Cost and Benefit Analysis. *Techniques, Estimates and Implications*“. **Chapter 5 "Vehicle Costs"**. Page 5.1-14. <https://www.vtppi.org/tca/tca0501.pdf>
- WASHINGTON, S.P., M.G. KARLAFTIS, und F. MANNERING. 2011. „Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis.“ 544. Chapman and Hall/CRC.
- WEIKL, S., und K. BOGENBERGER. 2016. „Integrated Relocation Model for Free-Floating Carsharing Systems.“ *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2563(1)): 19 - 27.
- WINKLER, C., und T. MOCANU. 2017. „Methodology and Application of a German National Passenger Transport Model for Future Transport Scenarios.“ *45th European Transport Conference*. Barcelona.

WRIGHT, S., und NELSON, J. D. 2014. An investigation into the feasibility and potential benefits of shared taxi services to commuter stations. *Urban, Planning and Transport Research*, 2(1), 147 - 161. doi:<https://doi.org/10.1080/21650020.2014.908736>

ZAHAVI, Y. 1982. *The UMOT Travel Model II*. Broxburn CT: Mobility Systems.

ZWICK, F., KUEHNEL, N., MOECKEL, R., und AXHAUSEN, K. W. 2021. Agent-based simulation of city-wide autonomous ride-pooling and the impact on traffic noise. 90. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102673>

## 4377.6. Tabellenverzeichnis

<a href="#">Tabelle 2-1. Reiseentfernungen von Tages- und Übernachtungsreisen .....</a>	<a href="#">2747</a>
<a href="#">Tabelle 2-2. Anzahl der Datensätze und Prozentsatz der gewichteten Personen nach Fahrtzweck und Fahrtarten .....</a>	<a href="#">3727</a>
<a href="#">Tabelle 2-3. Anzahl der Datensätze und Prozentsatz der gewichteten Personen nach Fahrtzweck und Fahrtarten .....</a>	<a href="#">3727</a>
<a href="#">Tabelle 2-4. Durchschnittliche Reisedistanz (km) nach Fahrtzweck und Fahrtarten .....</a>	<a href="#">3828</a>
<a href="#">Tabelle 2-5. Verkehrsmittel Anteile - Tagesausflug .....</a>	<a href="#">4134</a>
<a href="#">Tabelle 2-6. Verkehrsmittel Anteile –Ausflug mit Übernachtung .....</a>	<a href="#">4134</a>
<a href="#">Tabelle 3-1. Synthetische Bevölkerung - Attribute .....</a>	<a href="#">5747</a>
<a href="#">Tabelle 3-2. Ergebnis der synthetischen Bevölkerungsgenerierung .....</a>	<a href="#">5848</a>
<a href="#">Tabelle 3-3. Quellen der amtlichen Bevölkerungsprognose nach Bundesländern .....</a>	<a href="#">6154</a>
<a href="#">Tabelle 3-4. Bevölkerung und Haushalt in 2011 und 2030 .....</a>	<a href="#">6454</a>
<a href="#">Tabelle 3-5. Planungsstand 1 bis 18 .....</a>	<a href="#">6757</a>
<a href="#">Tabelle 3-6. Schätzergebnis des Fernfahrtengenerierungsmodells .....</a>	<a href="#">7363</a>
<a href="#">Tabelle 3-7 Ergebnis der Schätzung der Fernfahrtengenerierung .....</a>	<a href="#">7464</a>
<a href="#">Tabelle 3-8. Schätzergebnis des Fernziel-Auswahlmodells (Tagesausflug, Inland und Ausland) .....</a>	<a href="#">7565</a>
<a href="#">Tabelle 3-9 Ergebnis der Schätzung der Fernfahrtenzielwahl (Tagesausflug, Inland und Ausland) .....</a>	<a href="#">7565</a>
<a href="#">Tabelle 3-10. Schätzergebnis des Fernziel-Auswahlmodells (Ausflug mit Übernachtung, grobes Zielwahl: Inland, internationales Europa und Übersee) .....</a>	<a href="#">7767</a>
<a href="#">Tabelle 3-11 Ergebnis der Schätzung der Fernfahrtenzielwahl (Ausflug mit Übernachtung, grobes Zielwahl: Inland, internationales Europa und Übersee) .....</a>	<a href="#">7868</a>
<a href="#">Tabelle 3-12. Schätzergebnis des Fernziel-Auswahlmodells (Ausflug mit Übernachtung, Inland und Ausland Europa) .....</a>	<a href="#">7969</a>
<a href="#">Tabelle 3-13 Ergebnis der Schätzung der Fernfahrtenzielwahl (Ausflug mit Übernachtung, Inland) .....</a>	<a href="#">7969</a>
<a href="#">Tabelle 3-14. Verkehrsmittelauswahlkoeffizienten für Tagesausflüge .....</a>	<a href="#">8272</a>
<a href="#">Tabelle 3-15. Verkehrsmittelauswahlkoeffizienten für Übernachtungsfahrten .....</a>	<a href="#">8272</a>
<a href="#">Tabelle 3-16 Ergebnisse der Schätzung der Verkehrsmittelwahl (Tagesausflug, Inland und Europa) .....</a>	<a href="#">8373</a>
<a href="#">Tabelle 3-17 Ergebnisse der Schätzung der Verkehrsmittelwahl (Inländischer Ausflug mit Übernachtung) .....</a>	<a href="#">8373</a>
<a href="#">Tabelle 3-18 Ergebnisse der Schätzung der Verkehrsmittelwahl (Ausflug mit Übernachtung in Europa) .....</a>	<a href="#">8373</a>
<a href="#">Tabelle 3-19. Vergleich zwischen beobachtete und simulierte Zählungen und Berechnung des RMSE .....</a>	<a href="#">9686</a>

Tabelle 3-20. Aggregiertes Modell - Vergleich zwischen beobachteten und simulierten Zählungen und Berechnung des RMSE.....	10999
Tabelle 3-21. Szenario 1 - Varianten.....	112402
Tabelle 3-22. Szenario 2 - Varianten.....	113403
Tabelle 3-23. Szenario 3 - Varianten.....	114404
Tabelle 3-24. Szenario 4 - Varianten.....	115405
Tabelle 3-25: Szenario 7 - Varianten.....	116406
Tabelle 3-26. Zusammenfassung der berechneten Indikatoren.....	117407
Tabelle 3-27. Emissionsfaktoren nach Verkehrsmittel (Umwelt Bundesamt, 2021).....	120410
Tabelle 2-1. Reiseentfernungen von Tages- und Übernachtungsreisen.....	22
Tabelle 2-2. Anzahl der Datensätze und Prozentsatz der gewichteten Personen nach Fahrtzweck und Fahrtarten.....	32
Tabelle 2-3. Anzahl der Datensätze und Prozentsatz der gewichteten Personen nach Fahrtzweck und Fahrtarten.....	32
Tabelle 2-4. Durchschnittliche Reisedistanz (km) nach Fahrtzweck und Fahrtarten.....	33
Tabelle 2-5. Verkehrsmittel Anteile - Tagesausflug.....	36
Tabelle 2-6. Verkehrsmittel Anteile - Ausflug mit Übernachtung.....	36
Tabelle 3-1. Synthetische Bevölkerung - Attribute.....	52
Tabelle 3-2. Ergebnis der synthetischen Bevölkerungsgenerierung.....	53
Tabelle 3-3. Quellen der amtlichen Bevölkerungsprognose nach Bundesländern.....	56
Tabelle 3-4. Bevölkerung und Haushalt in 2011 und 2030.....	59
Tabelle 3-5. Planungsstand 1 bis 18.....	62
Tabelle 3-6. Schätzergebnis des Fernfahrtengenerierungsmodells.....	68
Tabelle 3-7 Ergebnis der Schätzung der Fernfahrtengenerierung.....	69
Tabelle 3-8. Schätzergebnis des Fernziel-Auswahlmodells (Tagesausflug, Inland und Ausland).....	70
Tabelle 3-9 Ergebnis der Schätzung der Fernfahrtenzielwahl (Tagesausflug, Inland und Ausland).....	70
Tabelle 3-10. Schätzergebnis des Fernziel-Auswahlmodells (Ausflug mit Übernachtung, grobes Zielwahl: Inland, internationales Europa und Übersee).....	72
Tabelle 3-11 Ergebnis der Schätzung der Fernfahrtenzielwahl (Ausflug mit Übernachtung, grobes Zielwahl: Inland, internationales Europa und Übersee).....	73
Tabelle 3-12. Schätzergebnis des Fernziel-Auswahlmodells (Ausflug mit Übernachtung, Inland und Ausland-Europa).....	74
Tabelle 3-13 Ergebnis der Schätzung der Fernfahrtenzielwahl (Ausflug mit Übernachtung, Inland).....	74
Tabelle 3-14. Verkehrsmittelauswahlkoeffizienten für Tagesausflüge.....	77
Tabelle 3-15. Verkehrsmittelauswahlkoeffizienten für Übernachtungsfahrten.....	77

**Formatiert:** Absatz-Standardschriftart, Rechtschreibung und Grammatik prüfen

Tabelle 3-16 Ergebnisse der Schätzung der Verkehrsmittelwahl (Tagesausflug, Inland und Europa).....	78
Tabelle 3-17 Ergebnisse der Schätzung der Verkehrsmittelwahl (Inländischer Ausflug mit Übernachtung).....	78
Tabelle 3-18 Ergebnisse der Schätzung der Verkehrsmittelwahl (Ausflug mit Übernachtung in Europa).....	78
Tabelle 3-19. Vergleich zwischen beobachtete und simulierte Zählungen und Berechnung des RMSE.....	94
Tabelle 3-20. Aggregiertes Modell – Vergleich zwischen beobachteten und simulierten Zählungen und Berechnung des RMSE.....	104
Tabelle 3-21. Szenario 1 – Varianten.....	107
Tabelle 3-22. Szenario 2 – Varianten.....	108
Tabelle 3-23. Szenario 3 – Varianten.....	109
Tabelle 3-24. Szenario 4 – Varianten.....	110
Tabelle 3-25: Szenario 7 – Varianten.....	114
Tabelle 3-26. Zusammenfassung der berechneten Indikatoren.....	112
Tabelle 3-27. Emissionsfaktoren nach Verkehrsmittel (Umwelt Bundesamt, 2021).....	115
Tabelle 4-1. Basisszenario – Erreichbarkeit.....	120
Tabelle 4-2. Basisszenario – Modal Split.....	121
Tabelle 4-3. Verkehrsbezogene Indikatoren des Basisszenarios.....	123
Tabelle 4-4. Basisszenario – CO <sub>2</sub> -Emissionen (t).....	124
Tabelle 4-5. Basisszenario – Belastung von Haushalten durch Bepreisung nach Einkommensgruppen.....	127
Tabelle 4-6. Modal Split.....	127
Tabelle 4-7. Werte der Indikatoren im Basisszenario des aggregierten Modells.....	128
Tabelle 4-8. Szenario 1 Sensitivitätsanalyse – Modal Split.....	132
Tabelle 4-9. Szenario 1 – Fernzug Erreichbarkeit.....	133
Tabelle 4-10. Szenario 1 – Modal Split.....	133
Tabelle 4-11. Szenario 1 – Verkehrsbezogene Indikatoren.....	134
Tabelle 4-12. Szenario 1 – Umweltbezogene Indikatoren.....	135
Tabelle 4-13. Szenario 1 – CO <sub>2</sub> -äquivalente Emissionen.....	136
Tabelle 4-14. Szenario 1 – Belastung der Haushalte durch Bepreisung nach Einkommensgruppen.....	136
Tabelle 4-15. Szenario 1 im aggregierten Modell – Modal Split.....	137
Tabelle 4-16. Szenario 1 in aggregierten Modell – Indikatoren.....	138
Tabelle 4-17. Szenario 2 – Sensitivitätsanalyse – Modal Split.....	143
Tabelle 4-18. Szenario 2 – Fernbus Erreichbarkeit.....	144

**Formatiert:** Absatz-Standardschriftart, Rechtschreibung und Grammatik prüfen

**Formatiert** ...



Tabelle 4-51. Szenario 5 – Modal Split.....	176
Tabelle 4-52. Szenario 5 – Indikatoren .....	177
Tabelle 4-53. Szenario 6 – Modal Split.....	178
Tabelle 4-54. Szenario 6 – Verkehrsbezogene Indikatoren .....	179
Tabelle 4-55. Szenario 6 – Umweltbezogene Indikatoren .....	180
Tabelle 4-56. Szenario 6 – CO <sub>2</sub> -äquivalente Emissionen .....	181
Tabelle 4-57. Szenario 6 – Belastung der Haushalte durch Bepreisung nach Einkommensgruppen .....	181
Tabelle 4-58. Szenario 6 im aggregierten Modell – Modal Split.....	182
Tabelle 4-59. Szenario 6 im aggregierten Modell – Indikatoren.....	182
Tabelle 4-60. Szenario 7 Sensitivitätsanalyse – Modal Split .....	183
Tabelle 4-61. Szenario 7 – PKW Erreichbarkeit .....	183
Tabelle 4-62. Szenario 7 – Modal Split.....	184
Tabelle 4-63. Szenario 7 – Verkehrsbezogene Indikatoren .....	184
Tabelle 4-64. Szenario 7 – Umweltbezogene Indikatoren .....	185
Tabelle 4-65. Szenario 7 – CO <sub>2</sub> -äquivalente Emissionen .....	185
Tabelle 4-66. Szenario 7 – Belastung der Haushalte durch Bepreisung nach Einkommensgruppen .....	186
Tabelle 4-67. Szenario 7 im aggregierten Modell – Modal Split.....	186
Tabelle 4-68. Szenario 7 im aggregierten Modell – Indikatoren.....	187

**Formatiert:** Absatz-Standardschriftart, Rechtschreibung und Grammatik prüfen

**Formatiert:** Absatz-Standardschriftart, Rechtschreibung und Grammatik prüfen, Nicht Hochgestellt/ Tiefgestellt

**Formatiert:** Absatz-Standardschriftart, Rechtschreibung und Grammatik prüfen

**Formatiert:** Absatz-Standardschriftart, Rechtschreibung und Grammatik prüfen, Nicht Hochgestellt/ Tiefgestellt

**Formatiert:** Absatz-Standardschriftart, Rechtschreibung und Grammatik prüfen

## 4378-7. Bildersverzeichnis

<u>Bild 2-1. Verteilung der Entfernung nach Wegezweck von Tagesfahrten (Wege Datensatz der MiD)</u>	<u>2919</u>
<u>Bild 2-2. Kumulierte Fahrtenlängenverteilung nach Wegezweck von Tagesfahrten (Wege Datensatz der MiD)</u>	<u>3020</u>
<u>Bild 2-3. Verteilung der Reisedistanzen nach Fahrtzweck von Übernachtungsfahrten (Reise Datensatz der MiD)</u>	<u>3020</u>
<u>Bild 2-4. Kumulative Reisedistanzverteilung nach Fahrtzweck von Übernachtungsreisen (Reise Datensatz der MiD)</u>	<u>3124</u>
<u>Bild 2-5. Verteilung der Fahrtentfernung nach Hauptverkehrsmittel für Tagesfahrten (Wege Datensatz der MiD)</u>	<u>3222</u>
<u>Bild 2-6. Kumulative Verteilung der Fahrtentfernung nach Hauptverkehrsmittel für Tagesfahrten (Wege Datensatz der MiD)</u>	<u>3323</u>
<u>Bild 2-7. Verteilung der Reiseentfernung nach Verkehrsmittel bei Übernachtungsreisen (Reise Datensatz der MiD)</u>	<u>3424</u>
<u>Bild 2-8. Kumulative Verteilung der Reiseentfernung nach Verkehrsmittel bei Übernachtungsreisen (Reise Datensatz der MiD)</u>	<u>3525</u>
<u>Bild 2-9. Umfrage Reisezeiten und MATSim Distanz</u>	<u>3929</u>
<u>Bild 2-10. Geschwindigkeitsverteilung (Umfrage Reisezeiten / MATSim Entfernungen)</u>	<u>4030</u>
<u>Bild 2-11. Anzahl der Fahrten nach Verkehrsmittel (Bahn schließt Fernverkehr, Regional- und S-Bahn ein, OESPV umfasst Reisebus, Fernlinienbus, Stadt- und Regionalbus, U-Bahn und Tram).</u>	<u>4232</u>
<u>Bild 2-12. Anzahl der Fahrten nach Fahrtzweck</u>	<u>4333</u>
<u>Bild 2-13. Straßenverkehrszählungen auf Autobahnen und Bundesstraßen in Deutschland (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)</u>	<u>4434</u>
<u>Bild 2-14. Straßennetz (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)</u>	<u>4636</u>
<u>Bild 2-15. Fernzüge- (rot) und ÖPNV-Netz (blau) (die Lücken in der Karte sind Orte, an denen GTFS nicht verfügbar war) (Quelle: gtfs.de, Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)</u>	<u>4737</u>
<u>Bild 2-16. Fernbus-Netzwerk (FlixBus) (Quelle transitfeeds.com/flixbus, Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)</u>	<u>4838</u>
<u>Bild 2-17. Flugrouten von/zu deutschen Flughäfen (Quelle: openflights.org, Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)</u>	<u>5040</u>
<u>Bild 2-18. Kosten pro Kilometer von Luftverkehr</u>	<u>5144</u>
<u>Bild 2-19. Kosten pro Kilometer von Fernzug</u>	<u>5144</u>
<u>Bild 2-20. Kosten pro Kilometer von Fernbus</u>	<u>5242</u>
<u>Bild 2-21. Reisezeiten in Stunden von Münchner Hauptbahnhof nach Verkehrsmittel</u>	<u>5444</u>
<u>Bild 3-1. Internes und externes Zonensystem (Zonen in Übersee sind nicht dargestellt). (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende)</u>	<u>5646</u>

<a href="#">Bild 3-2. Zonensystem des Untersuchungsgebiets in Deutschland (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende) .....</a>	<a href="#">5646</a>
<a href="#">Bild 3-3. Bevölkerungsdichte der älteren Menschen (älter als 65 Jahre alt) (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende) .....</a>	<a href="#">5949</a>
<a href="#">Bild 3-4. Durchschnittliche Haushaltgröße. (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende) .....</a>	<a href="#">6050</a>
<a href="#">Bild 3-5. Relativer Differenz in der Bevölkerungsdichte zwischen 2011 und 2030. (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende) .....</a>	<a href="#">6353</a>
<a href="#">Bild 3-6. Verteilung der Pendeldistanz .....</a>	<a href="#">6555</a>
<a href="#">Bild 3-7. Übersicht der Straßenprojekte im Bundesverkehrswegeplan 2030 (Quelle <a href="https://www.bvwp-projekte.de/map_street.html">https://www.bvwp-projekte.de/map_street.html</a>).....</a>	<a href="#">6656</a>
<a href="#">Bild 3-8 Projektdossier Erweiterung von vier auf sechs Fahrstreifen (<a href="https://www.bvwp-projekte.de/strasse/A57-G20-NW/A57-G20-NW.html">https://www.bvwp-projekte.de/strasse/A57-G20-NW/A57-G20-NW.html</a>) .....</a>	<a href="#">6858</a>
<a href="#">Bild 3-9. Darstellung in JOSM (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende). Projektnummer A57-G20-NW (<a href="https://www.bvwp-projekte.de/strasse/A57-G20-NW/A57-G20-NW.html">https://www.bvwp-projekte.de/strasse/A57-G20-NW/A57-G20-NW.html</a>) und A001-G10-NW-RP-T01-RP (<a href="https://www.bvwp-projekte.de/strasse/A001-G10-NW-RP-T01-RP/A001-G10-NW-RP-T01-RP.html">https://www.bvwp-projekte.de/strasse/A001-G10-NW-RP-T01-RP/A001-G10-NW-RP-T01-RP.html</a>) .....</a>	<a href="#">6959</a>
<a href="#">Bild 3-10. Überblick des agentenbasierten Modells.....</a>	<a href="#">7060</a>
<a href="#">Bild 3-11 Struktur der Zielwahlmodelle.....</a>	<a href="#">7464</a>
<a href="#">Bild 3-12. Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Abfahrtszeit - PKW.....</a>	<a href="#">8474</a>
<a href="#">Bild 3-13. Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Abflugzeit - Flugzeug .....</a>	<a href="#">8575</a>
<a href="#">Bild 3-14. Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Abfahrtszeit - Fernbus .....</a>	<a href="#">8575</a>
<a href="#">Bild 3-15. Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Abfahrtszeit - Fernzug.....</a>	<a href="#">8676</a>
<a href="#">Bild 3-16. Aufbau des agentenbasierten Verkehrsmodells (die Ziffer entspricht der Reihenfolge der Submodelle).....</a>	<a href="#">8777</a>
<a href="#">Bild 3-17 Verkehrsmittelwahl im Personennahverkehr .....</a>	<a href="#">8979</a>
<a href="#">Bild 3-18. Häufigkeitsverteilung der Abfahrtszeit nach MiD.....</a>	<a href="#">9080</a>
<a href="#">Bild 3-19. Simulierte Güterverkehrsströme in Deutschland (erstellt mit VIA – MATSim visualizer).....</a>	<a href="#">9181</a>
<a href="#">Bild 3-20. Scoring Werte nach 50 MATSim Iterationen .....</a>	<a href="#">9383</a>
<a href="#">Bild 3-21. Vergleich zwischen Modelsergebnissen (hell) und der Verkehrsprognose (dunkel) (nur innerdeutscher Verkehr eingeschlossen) .....</a>	<a href="#">9484</a>
<a href="#">Bild 3-22. Vergleich der simulierten ausländischen Fahrten mit Übernachtung zu Eurostat .....</a>	<a href="#">9585</a>
<a href="#">Bild 3-23. Agentenbasiertes Modell - Validierung der Verkehrsumlegung mit dem Vergleich zu beobachteten Verkehrszählungen.....</a>	<a href="#">9686</a>
<a href="#">Bild 3-24. Vergleich der Zählungen auf Autobahn A4.....</a>	<a href="#">9787</a>
<a href="#">Bild 3-25. Bundesfernstraßennetz (Quelle: OpenStreetMap. © OpenStreetMap-Mitwirkende) ..</a>	<a href="#">9889</a>
<a href="#">Bild 3-26. Vorgehen zur Erstellung von Tripel OV und DV.....</a>	<a href="#">10191</a>
<a href="#">Bild 3-27. Vereinfachte Darstellung des Graphen im aggregierten Netzwerkmodell.....</a>	<a href="#">10292</a>
<a href="#">Bild 3-28. Anfrage der Verbindung zwischen zwei Bahnhöfen im lokalen OpenTripPlaner Server (erstellt mit OpenTripPlaner) .....</a>	<a href="#">10393</a>

Bild 3-29. Komplette Prozessdarstellung im Aggregierten Netzwerkmodell.....	10494
Bild 3-30. Auftrennung der MIV Route: untergeordnete Teile werden in OSRM einmal bestimmt, während der Teil auf der Bundesfernverkehrsstraße Teil der SUMO Simulation ist (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende) .....	10696
Bild 3-31: Aggregiertes Modell – Validierung der Verkehrsumlegung mit dem Vergleich zu beobachteten Daten aus Verkehrszählungen.....	10999
Bild 4-1. Validierung der Verkehrsumlegung mit dem Vergleich zu beobachteten Verkehrszählungen (Vergleich beider Modelle) .....	215415
Bild 2-1. Verteilung der Entfernung nach Wegezweck von Tagesfahrten (Wege Datensatz der MiD).....	24
Bild 2-2. Kumulierte Fahrtenlängenverteilung nach Wegezweck von Tagesfahrten (Wege Datensatz der MiD).....	25
Bild 2-3. Verteilung der Reisedistanzen nach Fahrtzweck von Übernachtungsfahrten (Reise Datensatz der MiD).....	25
Bild 2-4. Kumulative Reisedistanzverteilung nach Fahrtzweck von Übernachtungsreisen (Reise Datensatz der MiD).....	26
Bild 2-5. Verteilung der Fahrtentfernung nach Hauptverkehrsmittel für Tagesfahrten (Wege Datensatz der MiD).....	27
Bild 2-6. Kumulative Verteilung der Fahrtentfernung nach Hauptverkehrsmittel für Tagesfahrten (Wege Datensatz der MiD).....	28
Bild 2-7. Verteilung der Reiseentfernung nach Verkehrsmittel bei Übernachtungsreisen (Reise Datensatz der MiD).....	29
Bild 2-8. Kumulative Verteilung der Reiseentfernung nach Verkehrsmittel bei Übernachtungsreisen (Reise Datensatz der MiD).....	30
Bild 2-9. Umfrage Reisezeiten und MATSim Distanz .....	34
Bild 2-10. Geschwindigkeitsverteilung (Umfrage Reisezeiten / MATSim Entfernungen).....	35
Bild 2-11. Anzahl der Fahrten nach Verkehrsmittel (Bahn schließt Fernverkehr, Regional- und S-Bahn ein, OESPV umfasst Reisebus, Fernlinienbus, Stadt- und Regionalbus, U-Bahn und Tram).....	37
Bild 2-12. Anzahl der Fahrten nach Fahrtzweck.....	38
Bild 2-13. Straßenverkehrszählungen auf Autobahnen und Bundesstraßen in Deutschland (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende) .....	39
Bild 2-14. Straßennetz (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende) .....	41
Bild 2-15. Fernzüge (rot) und ÖPNV-Netz (blau) (die Lücken in der Karte sind Orte, an denen GTFS nicht verfügbar war) (Quelle: gtfs.de, Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende) .....	42
Bild 2-16. Fernbus-Netzwerk (Flixbus) (Quelle: transitfeeds.com/flixbus, Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende) .....	43
Bild 2-17. Flugrouten von/zu deutschen Flughäfen (Quelle: openflights.org, Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende) .....	45
Bild 2-18. Kosten pro Kilometer von Luftverkehr .....	46
Bild 2-19. Kosten pro Kilometer von Fernzug .....	46

**Formatiert:** Absatz-Standardschriftart, Rechtschreibung und Grammatik prüfen

Bild 2-20. Kosten pro Kilometer von Fernbus.....	47
Bild 2-21. Reisezeiten in Stunden von Münchner Hauptbahnhof nach Verkehrsmittel.....	49
Bild 3-1. Internes und externes Zonensystem (Zonen in Übersee sind nicht dargestellt). (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende).....	51
Bild 3-2. Zonensystem des Untersuchungsgebiets in Deutschland (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende).....	51
Bild 3-3. Bevölkerungsdichte der älteren Menschen (älter als 65 Jahre alt) (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende).....	54
Bild 3-4. Durchschnittliche Haushaltgröße. (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende).....	55
Bild 3-5. Relativer Differenz in der Bevölkerungsdichte zwischen 2011 und 2030. (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende).....	58
Bild 3-6. Verteilung der Pendeldistanz.....	60
Bild 3-7. Übersicht der Straßenprojekte im Bundesverkehrswegeplan 2030 (Quelle <a href="https://www.bvwp-projekte.de/map_street.html">https://www.bvwp-projekte.de/map_street.html</a> ).....	61
Bild 3-8. Projektdossier Erweiterung von vier auf sechs Fahrstreifen ( <a href="https://www.bvwp-projekte.de/strasse/A57-G20-NW/A57-G20-NW.html">https://www.bvwp-projekte.de/strasse/A57-G20-NW/A57-G20-NW.html</a> ).....	63
Bild 3-9. Darstellung in JOSM (Hintergrund © OpenStreetMap-Mitwirkende). Projektnummer A57-G20-NW ( <a href="https://www.bvwp-projekte.de/strasse/A57-G20-NW/A57-G20-NW.html">https://www.bvwp-projekte.de/strasse/A57-G20-NW/A57-G20-NW.html</a> ) und A001-G10-NW-RP-T01-RP ( <a href="https://www.bvwp-projekte.de/strasse/A001-G10-NW-RP-T01-RP/A001-G10-NW-RP-T01-RP.html">https://www.bvwp-projekte.de/strasse/A001-G10-NW-RP-T01-RP/A001-G10-NW-RP-T01-RP.html</a> ).....	64
Bild 3-10. Überblick des agentenbasierten Modells.....	65
Bild 3-11 Struktur der Zielwahlmodelle.....	69
Bild 3-12. Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Abfahrtszeit – PKW.....	79
Bild 3-13. Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Abflugzeit – Flugzeug.....	80
Bild 3-14. Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Abfahrtszeit – Fernbus.....	80
Bild 3-15. Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Abfahrtszeit – Fernzug.....	81
Bild 3-16. Aufbau des agentenbasierten Verkehrsmodells (die Ziffer entspricht der Reihenfolge der Submodelle).....	82
Bild 3-17 Verkehrsmittelwahl im Personennahverkehr.....	84
Bild 3-18. Häufigkeitsverteilung der Abfahrtszeit nach MiD.....	85
Bild 3-19. Simulierte Güterverkehrsströme in Deutschland (erstellt mit VIA – MATSim visualizer).....	86
Bild 3-20. Scoring Werte nach 50 MATSim Iterationen.....	88
Bild 3-21. Vergleich zwischen Modelergebnissen (hell) und der Verkehrsprognose (dunkel) (nur innerdeutscher Verkehr eingeschlossen).....	89
Bild 3-22. Vergleich der simulierten ausländischen Fahrten mit Übernachtung zu Eurostat.....	90
Bild 3-23. Agentenbasiertes Modell – Validierung der Verkehrsumlegung mit dem Vergleich zu beobachteten Verkehrszählungen.....	94
Bild 3-24. Vergleich der Zählungen auf Autobahn A4.....	92

**Formatiert:** Absatz-Standardschriftart, Rechtschreibung und Grammatik prüfen



