

Strategische Verkehrsprognose

Rückkopplung einer Makroskopischen Extrapolation mit einer Mikroskopischen Verkehrssimulation

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Dr.-Ing.
von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

Dipl.-Geogr. Carina Thaller
aus
Hutthurm

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Juni 2018

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Uwe Clausen
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bert Leerkamp

Dortmund, 2018

Zusammenfassung

Strukturelle Veränderungen in gesellschaftlichen, ökonomischen und politischen Systemen beeinflussen die Verkehrsnachfrage auf infrastruktureller Ebene, genauso wie individuelle Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer Auswirkungen auf die Strukturen dieser Systeme haben. Die Dynamiken dieser Systeme werden meist in einem langfristigen Betrachtungshorizont beobachtet. Verhaltensänderungen und Entscheidungsprozesse individueller, heterogener Verkehrsteilnehmer auf infrastruktureller Ebene können nur in einem kurzfristigen Betrachtungshorizont untersucht werden.

Die entwickelte Rückkopplung zwischen einer Makroskopischen Extrapolation (MEP) und einer Mikroskopischen Verkehrssimulation (MVS) ist bisher der einzige Verkehrsmodellierungsansatz, der verschiedene dynamische Systeme berücksichtigt. Dieses Modellierungsinstrument ermöglicht eine Strategische Verkehrsprognose für einen langfristigen Betrachtungshorizont und verliert darüber hinaus nicht den räumlichen Kontext. Die langfristigen, strukturellen Veränderungen des Gesamtsystems werden mittels der MEP abgebildet, die MVS dagegen zeigt kurzfristige Veränderungen von Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer auf infrastruktureller Ebene. Mittels der MVS wird der räumliche Kontext zur Anpassung der räumlich beeinflussten Parameter in der MEP herangezogen. Die MEP dient hingegen zur Fortschreibung der Rahmenbedingungen und Raumstrukturen in der MVS. Demzufolge sind die beiden dynamischen Simulationen zur gegenseitigen Anpassung zueinander rückgekoppelt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die grundlegende Funktionalität des entwickelten, strategischen Modellierungsinstruments gezeigt. Mittels des Ansatzes wird das Verhalten großer, komplexer Verkehrssysteme auf aggregierter und disaggregierter Ebene in einem langfristigen Betrachtungshorizont analysiert. Der Ansatz bedient sich dabei nicht nur verschiedener Aggregationsniveaus und arbeitet dementsprechend mit zwei verschiedenen Analysemaßstäben, er berücksichtigt darüber hinaus zwei zeitliche Betrachtungshorizonte. Zudem erlaubt dieser Ansatz, Effekte externer Rahmenbedingungen, wie politische Eingriffe, auf das betrachtete System einerseits langfristig auf aggregierter Ebene, aber auch zeitpunktgenau auf infrastruktureller Ebene abzuschätzen.

Die Operabilität des entwickelten Ansatzes wird im Rahmen eines Fallbeispiels zum Kurier-, Express- und Paketmarkt (KEP-Markt) in Berlin unter Beweis gestellt. Zu diesem Zweck wird als MEP der System Dynamics (SD) Ansatz nach Forrester [49] verwendet. Weiterführend wird als MVS die mikroskopische, agentenbasierte Verkehrssimulation MATSim von Balmer et al. [8] genutzt. Die Formalisierung, Parametrisierung und Kalibrierung des Rückkopplungsansatzes zum Fallbeispiel wird im Detail aufgezeigt. In diesem Zuge werden neben einem Basisszenario zur langfristigen Prognose des KEP-Verkehrs in Berlin Maßnahmen szenarien entwickelt, die das betrachtete Gesamtsystem um ausgewählte verkehrspolitische und logistische Maßnahmen zur Regulierung des

KEP-Verkehrs in Städten erweitern. Dabei handelt es sich um die Maßnahmen Packstation, Distanzabhängige Maut und Cordon-Maut. Abschließend werden die finalen Simulationsergebnisse der entwickelten Strategischen Verkehrsprognose ausgewertet und diskutiert. Hierbei werden die Ergebnisse der Maßnahmenzenarien mit den Ergebnissen des Basisszenarios verglichen, um damit die Wirkungen der ausgewählten Maßnahmen auf das Gesamtsystem KEP-Verkehr in Städten aufzuzeigen.

Summary

Structural changes in social, economic and political systems influence the transport demand at infrastructural level, just as individual decisions of road users have an impact on the structures of these systems. The dynamics of these systems are usually observed in a long-term horizon. Behavioural changes and decision-making processes of individual, heterogeneous road users at spatial, infrastructural level can only be examined in a short-term horizon.

The developed feedback approach between a Macroscopic Extrapolation (MEP) and a Microscopic Transport Simulation (MTS) is so far the only transport modelling approach, which considers different dynamical systems. This modelling instrument enables a strategic transport forecast for a long-term horizon and does not lose beyond the spatial context. The long-term, structural changes of the overall system are illustrated by MEP, the MTS, however, shows short-term changes in decisions of road users at infrastructural level. By MTS, the spatial context is used to adapt the spatially influenced parameters in the MEP. By contrast, the MEP serves to update the constraints and spatial structures in the MTS. As a result, the two dynamics simulations are fed back to each other for mutual adaption.

The present research work demonstrates the basic functionality of the developed, strategic modelling instrument. The approach is suitable to analyse the behaviour of large, complex transport systems at aggregated and disaggregated level in a long-term horizon. The approach does not only use different levels of aggregation and accordingly works with two different analysis measures, it also takes into account two temporal observation horizons. In addition, this approach enables to assess the effects of external constraints, such as political interventions, on the observed transport system in a long-term horizon at aggregated level, but also point-in-time at infrastructural level.

The operability of the developed approach is demonstrated in the framework of a case example focussing on the courier, express and parcel (CEP) market in Berlin. For this purpose, the System Dynamics (SD) approach developed by Forrester [49] is used as a MEP. In addition, the microscopic, agent-based transport simulation MATSim developed by Balmer et al. [8] is used as a MTS. The formalisation, parametrisation and calibration of the feedback approach concerning the case example is shown in detail. Besides to the basis scenario for long-term forecasting CEP transport in Berlin, measure scenarios are developed, which extend the observed system with selected transport policy and logistics measures to regulate the CEP transport in urban areas. These are the measures package stations, distance toll and cordon toll. Finally, the simulation results of the developed Strategic Transport Forecast are evaluated and discussed. In this context, the results of the measure scenarios are compared with the results of the basis scenario to show the effects of the selected measures on the overall system CEP transport in urban areas.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	ii
Summary	iii
Tabellenverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xi
1. Einleitung	1
1.1. Zielsetzung	2
1.2. Aufbau	4
I. Theoretische Grundlagen	7
2. Kopplungsansatz	9
2.1. Verkehrssystem	9
2.2. Verkehrsmodell	10
2.3. Charakterisierung von Verkehrsmodellen	11
2.4. Generalisierung des Kopplungsansatzes	14
2.5. Systemarchitektur	16
II. Methodische Grundlagen	23
3. Verwendete Modellierungsinstrumente	25
3.1. System Dynamics Modellierung	26
3.1.1. Theorie	26
3.1.2. Methodisches Vorgehen	31
3.1.3. Methodisches Vorgehen zur Kalibrierung des SD-Ansatzes	34
3.1.4. SD-Modelle mit Bezug zum Verkehr	37
3.2. Agentenbasierte Verkehrssimulation	42
3.2.1. Methodisches Vorgehen im Überblick	44
3.2.2. Initialisierung der Welt und der Nachfrage	46
3.2.3. Mobilitätssimulation	49
3.2.4. Bewertung der Pläne	50
3.2.5. Planauswahl und Planerneuerung	56
3.3. Methodisches Vorgehen zur Entwicklung des Rückkopplungsansatzes	62

III. Fallbeispiel	63
4. Untersuchungsgegenstand	67
4.1. Wirtschaftsverkehr	67
4.2. Güterverkehrsmärkte	68
4.3. Kurier-, Express- und Paketmarkt	71
4.4. Relevanz des KEP-Verkehrs in urbanen Räumen	73
5. Formalisierung des Kopplungsansatzes	77
5.1. SD-Modell	78
5.1.1. Bevölkerung	79
5.1.2. KEP-Dienstleister	84
5.1.3. Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage	106
5.1.4. Überblick über das gesamte SD-Modell	108
5.2. MVS	109
5.2.1. Initialisierung der synthetischen Welt und der Nachfrage	109
5.2.2. Mikrosimulation	114
5.2.3. Datenanalyse	116
5.3. Kopplungsansatz	122
5.3.1. Aggregation	125
5.3.2. Disaggregation	126
6. Parametrisierung des Kopplungsansatzes	129
6.1. SD-Modell	129
6.1.1. Bevölkerung	129
6.1.2. Güternachfrage	130
6.1.3. Güterverkehrsnachfrage und -kapazität	131
6.1.4. Laufleistung und Kraftstoffverbrauch	132
6.1.5. Flottenbestand	134
6.1.6. Tourencharakteristika und Transportzeit	135
6.1.7. Transportkosten	137
6.1.8. Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage	140
6.2. MVS	140
6.2.1. Infrastrukturnetzwerk und Standorte der Akteure	141
6.2.2. Merkmale der Akteure	147
7. Kalibrierung des SD-Modells	153
7.1. Bevölkerung	153
7.2. Güternachfrage	154
7.3. Transportkosten	155
7.4. Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage	156
8. Entwicklung und Definition der Szenarien	159
8.1. Formalisierung	160

8.1.1. Packstationen	160
8.1.2. Distanzabhängige Maut	163
8.1.3. Cordon-Maut	166
8.2. Parametrisierung	168
8.2.1. Packstationen	168
8.2.2. City-Maut	170
8.3. Kalibrierung	172
9. Auswertung der Simulationsergebnisse	175
9.1. Bevölkerung	178
9.2. Güternachfrage	178
9.3. Güterverkehrsnachfrage	181
9.4. Laufleistung und Kraftstoffverbrauch	184
9.5. Flottenbestand	189
9.6. Tourencharakteristika und Transportzeit	192
9.7. Transportkosten	205
9.8. Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage	216
9.9. Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	222
10. Fazit	233
10.1. Zusammenfassung	233
10.2. Bewertung des entwickelten Kopplungsansatzes	235
Literaturverzeichnis	243
Anhang	253
A. Parametrisierungsergebnisse	A-1
B. Kalibrierungsergebnisse	B-9

Tabellenverzeichnis

2.1.	Komponenten der Verkehrsnachfrage	10
3.1.	Charakterisierung ausgewählter System Dynamics Ansätze	41
4.1.	Charakterisierung der Logistikteilmärkte	70
5.1.	Variablentypen	80
5.2.	Kohortenmodell zum Bevölkerungsmodul	82
5.3.	Emissionsklassen	90
5.4.	Kohortenmodell zum Flottenbestandsmodul	93
5.5.	Kohortenmodell zum Emissionsmodul	106
6.1.	Modellannahmen der BGL zur Berechnung der Transportkostenstrukturen	138
6.2.	MVS-Alterskohorten	143
6.3.	Alterskohorten nach der Deutschen Post DHL Group	143
6.4.	Initialisierung der Privatkunden	144
6.5.	Standorttypen der synthetischen KEP-Welt	146
7.1.	Auswertung der Kalibrierung des Submoduls Bevölkerung	154
7.2.	Auswertung der Kalibrierung des Submoduls Güternachfrage	155
7.3.	Auswertung der Kalibrierung des Submoduls Transportkosten	156
7.4.	Berechnung der historischen Zeitreihenwerte der Transportkostenbestand- teile	156
7.5.	Auswertung der Kalibrierung des Submoduls Ökologische Effekte	157
8.1.	Auswertung der Kalibrierung der Szenarien	173
9.1.	Initialisierung der Privatkunden	176
9.2.	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	225
9.3.	Mittlere prozentuale Abweichungen der Maßnahmenszenarien zum Ba- sisszenario	230
10.1.	Bewertung des entwickelten Kopplungsansatzes	241
A.1.	Modellparameter des Submoduls Bevölkerung	A-1
A.2.	Modellparameter des Submoduls Güternachfrage	A-4
A.3.	Modellparameter des Submoduls Güterverkehrsnachfrage und -kapazität	A-4
A.4.	Modellparameter des Submoduls Laufleistung und Kraftstoffverbrauch .	A-5

A.5.	Anteile der LKW-Fahrzeugtypen nach Emissionsklassen	A-5
A.6.	Modellparameter des Submoduls Flottenbestand	A-6
A.7.	Modellparameter des Submoduls Tourencharakteristika und Transportzeit	A-6
A.8.	Modellparameter des Submoduls Transportkosten	A-7
A.9.	Modellparameter des Submoduls Ökologische Effekte der Güterverkehrs- nachfrage	A-8
A.10.	Modellparameter der Szenarien	A-8
B.1.	Kalibrierung des Submoduls Bevölkerung	B-9
B.2.	Ergebnisse der Kalibrierung zum Submodul Bevölkerung	B-11
B.3.	Kalibrierung des Submoduls Güternachfrage	B-15
B.4.	Ergebnisse der Kalibrierung des Submoduls Güternachfrage	B-15
B.5.	Kalibrierung des Submoduls Transportkosten	B-16
B.6.	Ergebnisse der Kalibrierung zum Submodul Transportkosten	B-16
B.7.	Kalibrierung des Submoduls Ökologische Effekte	B-17
B.8.	Ergebnisse der Kalibrierung zum Submodul Ökologische Effekte	B-18
B.9.	Kalibrierung der Szenarien	B-20
B.10.	Ergebnisse der Kalibrierung der Szenarien	B-20

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Aufbau der Arbeit	5
2.1.	Charakteristika von Verkehrsmodellen	14
2.2.	Übergeordneter Kopplungsansatz	15
2.3.	Computergestützte, automatisierte Anwendung des Rückkopplungsansatzes	21
3.1.	Flussdiagramm eines SD-Modells	30
3.2.	Verfahren zur Entwicklung eines SD-Modells	33
3.3.	Verfahren zur Modellierung und Simulation von MATSim	45
3.4.	Methodisches Vorgehen zur Entwicklung des Rückkopplungsansatzes	62
4.1.	Differenzierung des Wirtschaftsverkehrs	68
4.2.	Segmentierung des Güterverkehrsmarktes	69
4.3.	Differenzierung des KEP-Marktes	72
4.4.	Problemstellung	76
5.1.	Formalisierung des Kopplungsansatzes zum Fallbeispiel KEP-Markt in urbanen Räumen	77
5.2.	SD-Modellstruktur	79
5.3.	Auszug des Flussdiagramms zur Bevölkerungsentwicklung	81
5.4.	Flussdiagramm zur Güternachfrage- und Güterverkehrsnachfrageentwicklung	84
5.5.	Berechnung des Kraftstoffverbrauchs	91
5.6.	Flussdiagramm zur Flottenbestandsentwicklung	92
5.7.	Flussdiagramm zur Transportzeitentwicklung	95
5.8.	Flussdiagramm zur Entwicklung der variablen Transportkosten	98
5.9.	Flussdiagramm zur Entwicklung der fixen Transportkosten	101
5.10.	Flussdiagramm zur Entwicklung der zeitlich abhängigen Transportkosten	103
5.11.	Flussdiagramm zur Entwicklung der Gesamttransportkosten	104
5.12.	Berechnung der mittleren Fixkosten pro LKW und der variablen Transportkosten pro km	105
5.13.	Berechnung der CO ₂ Emissionen im GV	107
5.14.	Berechnung der weiteren Emissionen im GV	108
5.15.	Modellierung und Aufbereitung der MVS	110
5.16.	Rückkopplungsansatz zwischen SD und MVS	123
5.17.	Technischer Kopplungsansatz zwischen SD und MVS	124

5.18.	Datentransfer zwischen SD und MVS	125
6.1.	Bevölkerungsstruktur in Berlin	142
6.2.	KEP-Landschaft in Berlin.	148
8.1.	Maßnahmenszenarien: Datentransfer zwischen SD und MVS	161
8.2.	Flussdiagramm zur Entwicklung der Packstationen	162
8.3.	Flussdiagramm zur Entwicklung der Distanzabhängigen Maut	164
8.4.	Flussdiagramm zur Entwicklung der Cordon-Maut	167
9.1.	Simulationsergebnisse zur Bevölkerungsentwicklung	178
9.2.	Simulationsergebnisse zur privaten Güternachfrage pro Kunde und zur gewerblichen Güternachfrage pro Mio. € BIP.	179
9.3.	Simulationsergebnisse zur Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts	180
9.4.	Güternachfrageentwicklung.	181
9.5.	Güterverkehrsnachfrageentwicklung.	182
9.6.	Entwicklung der Laufleistung auf der Letzten Meile.	185
9.7.	Entwicklung des Adblueverbrauchs.	187
9.8.	Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs.	188
9.9.	Entwicklung des Flottenbestands.	190
9.10.	Entwicklung des Dropfaktors.	194
9.11.	Sendungen pro Tour.	195
9.12.	Transportdistanz pro Tour.	196
9.13.	Simulationsergebnisse zur Durchschnittsgeschwindigkeit	198
9.14.	Stoppdauer.	199
9.15.	Stops pro Tour.	201
9.16.	Transportzeit pro Tour.	202
9.17.	Gesamttransportzeit.	204
9.18.	Personalkosten.	207
9.19.	Simulationsergebnisse zu Personalkosten pro Stunde	208
9.20.	Variable Transportkosten.	209
9.21.	Fixe Transportkosten.	210
9.22.	Gesamttransportkosten.	212
9.23.	Variable Transportkosten pro km.	213
9.24.	Fixe Transportkosten pro LKW.	215
9.25.	CO ₂ Emissionen.	217
9.26.	HC+NO _x Emissionen.	218
9.27.	CO Emissionen.	220
9.28.	PM ₁₀ Emissionen.	221

1. Einleitung

Das *Verkehrssystem* mit seinen Interdependenzen, Wirkungsbeziehungen und Rückkopplungen zu gesellschaftlichen, wirtschaftlichen, ökologischen und technischen Systemen ist sehr komplex und dynamisch. Sowohl die Verkehrsnachfrage als auch das Verkehrsangebot verändern sich stetig im Zuge dieser Einflussfaktoren. Strukturelle Veränderungen dieser Systeme führen zu einer Anpassung des Verhaltens der Verkehrsnachfrage. Basierend darauf muss demzufolge auch das Verkehrsangebot angepasst werden. Diese Prozesse entwickeln sich zwar innerhalb eines langfristigen Zeithorizonts. Dennoch haben diese Einfluss auf die konkreten Entscheidungen und auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer auf der infrastrukturellen Ebene innerhalb eines kurzfristigen Zeithorizonts. Damit bedingen sich die langfristig strukturellen Veränderungen des Gesamtsystems und kurzfristige Entscheidungen der einzelnen Verkehrsteilnehmer gegenseitig.

Aus diesem Grund ist ein grundlegendes Verständnis von Abhängigkeiten zwischen diesen Systemen sowie von Entscheidungen und Verhalten dieser Voraussetzung, um effiziente Lösungen für alle relevanten Akteure identifizieren und entwickeln zu können. Um nun die Wirkungen von Entscheidungen und Verhalten der Akteure des Verkehrs evaluieren zu können, muss im Vorfeld eine Abschätzung dieser Effekte erfolgen.

Zu diesem Zweck werden bereits heute in der Verkehrsplanung Verkehrsmodelle eingesetzt, um das Verkehrssystem grundlegend abzubilden. Zudem werden sie zur Abschätzung und Bewertung der Auswirkungen politischer Maßnahmen auf den Verkehr herangezogen. Somit leisten sie einen essentiellen Beitrag für Entscheidungsfindungsprozesse in der Verkehrsplanung.

Traditionelle Verkehrsmodelle beruhen auf einem Vier-Stufen-Ansatz. Ausgehend von regionalen Strukturdaten werden mittels Regressionsmodellen und empirisch ermittelten Verhaltenskennwerten Verkehrsströme auf Netzen generiert. Seit den 1980er Jahren werden Verkehrsmodelle als Gleichgewichtsmodelle mit Rückkopplungen zwischen den einzelnen Operationen auf den verschiedenen Stufen formuliert. In der Personenverkehrsmodellierung werden auf den jeweiligen Stufen ökonometrisch geschätzte Verhaltensmodelle eingesetzt (insbesondere Modelle diskreter Entscheidungen). Zunehmend wird der klassische Vier-Stufen-Ansatz durch aktivitätenbasierte Ansätze und dynamische Umlegungsmodelle sowie Mikrosimulationen erweitert. [28] Mikroskopische Verkehrsmodelle erlauben insbesondere die Abbildung einzelner Entscheidungsprozesse von heterogenen Verkehrsteilnehmern.

Jedoch ist es bisher nicht gelungen, ein Instrument zu entwickeln, das funktionale Verhaltensmuster und Interdependenzen der Akteurssysteme integriert und abbildet. Diese Modelle weisen häufig eine geringe Nachvollziehbarkeit für den Nutzer auf. Deshalb ist ein Modellierungsansatz mit einer transparenten und detaillierten Struktur zur Identifizierung dieser Wechselbeziehungen und Auswirkungen notwendig. [64] Ferner kann die Verkehrsnachfrage mittels traditioneller Verkehrsmodelle nicht dynamisch, vornehmlich über einen längeren, zeitlichen Betrachtungshorizont, simuliert und analysiert werden. Zwar erlauben Mikrosimulationen und Verkehrsflussmodelle eine dynamische Simulation für einen kurzen Zeitraum, eine Langzeitsimulation zur strategischen Verkehrsprognose ist jedoch damit nicht möglich.

Dagegen erlaubt eine makroskopische Extrapolation (u. a. systemdynamische Modelle) zwar mittel- und langfristige Prognosen. Jedoch wurde bisher keine Extrapolation entwickelt, die die räumliche Komponente berücksichtigt.

De Jong et al. [75], Kuchenbecker [91] und Weidmann et al. [170] leiten daraus die Notwendigkeit ab, eine makroskopische Extrapolation mit einem infrastrukturbasierten Verkehrsmodell zu koppeln.

1.1. Zielsetzung

Im Stand der Forschung gab es zwar bereits zwei Ansätze (u. a. Kraft et al. [86], Kuchenbecker [91]), die einen Rückkopplungsansatz zwischen einer makroskopischen Extrapolation mit einem Verkehrsmodell verfolgten. Jedoch wählten diese zur Kopplung ein makroskopisches Verkehrsmodell.

Im Gegensatz dazu wird beim vorliegenden Ansatz die Rückkopplung einer makroskopischen Extrapolation mit einer mikroskopischen Verkehrssimulation vorgenommen. Dementsprechend simuliert dieser Ansatz einerseits über lange Zeitperioden und verliert darüber hinaus nicht den räumlichen Kontext. Damit können sowohl langfristige, strukturelle Veränderungen des Gesamtsystems sowie kurzfristige Veränderungen von Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer auf der Infrastruktur berücksichtigt werden.

Es handelt sich dabei demzufolge um einen neuartigen Modellierungsansatz, den es bisher in der Verkehrsmodellierung nicht gegeben hat.

Vor diesem Hintergrund ist das methodische Ziel der vorliegenden Arbeit die Kopplung einer Makroskopischen Extrapolation (MEP) mit einer Mikroskopischen Verkehrssimulation (MVS). Dieser rückgekoppelte Ansatz nutzt in gleichem Maße die Prognosefähigkeit der MEP und die detaillierte, räumliche Auflösung der MVS. Mittels dieses kombinierten Einsatzes dieser Verkehrsmodellierungsinstrumente gelingt einerseits die Abbildung der Trendentwicklung des Verkehrs und seiner Auswirkungen über die Zeit und andererseits die genaue Analyse der räumlich verkehrlichen Wirkungen auf infrastruktureller Ebene. Dieser Ansatz erlaubt Verhaltensänderungen eines Gesamtsystems über die Zeit und im Detail auf infrastruktureller Ebene zu beobachten und zu analysieren. Dazu werden verschiedene Verkehrsentwicklungsszenarien für den Zeitraum von 15 Jahren entwickelt und ausgewertet.

Dementsprechend soll die MEP auf makroskopischer Ebene eine Analyse eines Gesamtsystems sowie Hochrechnungen und Trendanalysen für einen mittel- und langfristigen Betrachtungshorizont ermöglichen. Zu diesem Zweck findet der systemdynamische Modellierungsansatz nach Forrester [49] Anwendung, um komplexe Systeme abbilden und Trendprognosen für längere Zeiträume durchführen zu können.

Hingegen muss die MVS für den vorliegenden Kopplungsansatz einerseits die Abbildung des Verhaltens heterogener Individuen im System und andererseits die Darstellung individueller, kurzfristiger Entscheidungsprozesse auf der räumlichen Ebene erlauben. Das verhaltensensitive Verkehrsnachfragemodell MATSim (Multi-Agent Transport Simulation), das von Balmer et al. [8] entwickelt wurde, dient hierbei als MVS. Dieser mikroskopische Modellierungsansatz bietet nicht nur eine Simulationsumgebung für Fahrzeugbewegungen im Raum, sondern ebenso klare Schnittstellen für den Informationstransfer von physischer Ebene und individueller Entscheidungsebene. MATSim bildet die Dynamik des Verkehrssystems mittels einer Simulation des Verhaltens heterogener Verkehrsteilnehmer, sogenannter Agenten, innerhalb eines typischen Tages ab.

Die Stärken beider Methoden werden für den vorliegenden Ansatz genutzt, um die Prognosegenauigkeit zu erhöhen, sowie die Qualität und Aussagefähigkeit der Wirkungsanalyse mittels tagesbasierter Analysen und langfristiger Prognosen zu verbessern. [75, 91, 161, 170]

Die Operabilität dieses Ansatz soll im Rahmen eines Fallbeispiels zum Kurier-, Express- und Paketmarkt (KEP-Markt) in Berlin verifiziert werden. Hierbei sollen vornehmlich Einflüsse und verkehrliche Auswirkungen der geänderten Bedingungen (u. a. E-Commerce, demographischer Wandel, veränderte Sendungsgrößen und Sendungsstrukturen) genauer analysiert werden. KEP-Verkehre werden maßgeblich vom E-Commerce getrieben und nahmen bereits 2010 38% des gesamten Güterverkehrsaufkommens in Städten und Ballungsräumen ein [147]. Dies ist der am schnellsten wachsende und dominanteste Güterverkehrsbereich in Städten. KEP-Verkehre ersetzen in nahezu allen Sektoren die Belieferungen von Läden und Firmen. [81, S. 263f.]

In der vorliegenden Arbeit werden zudem Szenarien für die zukünftige Entwicklung des KEP-Verkehrs formuliert und untersucht, welche sowohl für die Verkehrspolitik als auch für die Logistik von Interesse sind.

Demzufolge soll der vorliegende Ansatz Auswirkungen struktureller Veränderungen des Verkehrsmarktes und des Verhaltens einzelner Akteure auf den Verkehr zeitpunktgenau und langfristig abschätzen können. Im Rahmen des Fallbeispiels zum KEP-Verkehr in urbanen Räumen liegt der Fokus auf Entscheidungsprozessen und dem Verhalten der Güternachfrage (u. a. Privathaushalte, Einzelhändler) und der resultierenden Güterverkehrsnachfrage des KEP-Dienstleisters. In diesem Kontext wird die Güternachfrage als die Nachfrage nach Paketen bzw. die Aufträge privater und gewerblicher Kunden der KEP-Dienstleister verstanden. Die mittels der MEP durchgeführten, langfristigen Zeitverlaufsprognosen sollen strukturelle Veränderungen im Verhalten auf aggregierter Ebene zeigen. Mittels der MEP sollen qualitativ valide Aussagen über Entwicklungstendenzen und Dynamiken als Auswirkungen der Güterverkehrsentwicklung, ökonomischer Aktivitäten und der Bevölkerungsentwicklung sowie ökologische Effekte auf urbaner Ebene

abgeleitet werden können. Die Ergebnisse der MEP werden an die MVS übergeben, um kurzfristige, zeitpunktgenaue Prognosen für die Güterverkehrsnachfrage an einem typischen Tag auf disaggregierter, netzbezogener Ebene durchführen zu können. Durch den kombinierten Ansatz sollen dementsprechend nicht nur Verhaltensänderungen im Zeitverlauf, sondern auch detaillierte, netzbezogene Analysen möglich sein. Zudem soll dieser Modellierungsansatz zur Identifizierung effizienter Lösungen für die urbane Güterverkehrsregulierung dienen.

1.2. Aufbau

Die vorliegende Arbeit wird in drei übergeordnete Teile gegliedert. Dabei wird zunächst im Teil I das theoretische Konzept der Strategischen Verkehrsprognose erläutert. Im Teil II wird die theoretische und methodische Funktionsweise der verwendeten Modellierungsinstrumente System Dynamics und der agentenbasierten Verkehrssimulation im Detail dargelegt. Danach wird im Teil III die Operationalisierbarkeit des übergeordneten Ansatzes in einem Fallbeispiel unter Beweis gestellt.

Nach der Einführung in die Thematik und der Ableitung der Zielsetzung der Arbeit in Kapitel 1 werden im Teil I theoretische Grundlagen für die vorliegende Arbeit präsentiert. In diesem Rahmen werden in Kapitel 2 relevante Begriffe definiert, um basierend darauf den entwickelten Kopplungsansatz und dessen Systemarchitektur zu generalisieren.

Im Teil II wird auf die methodischen Grundlagen im Detail eingegangen. In Kapitel 3 werden die verwendeten Modellierungsinstrumente für die vorliegende Arbeit theoretisch fundiert dargelegt. Als Makroskopische Extrapolation wird die Methodik System Dynamics (SD) für langfristige Trendprognosen herangezogen. Eine ausgewählte mikroskopische, agentenbasierte Verkehrssimulation — in diesem Fall das von Balmer et al. [8] entwickelte MATSim (Multi Agent Transport Simulation Tool) — dient zur Abbildung des Verhaltens heterogener Individuen im Verkehrssystem und zur Darstellung individueller, kurzfristiger Entscheidungsprozesse auf der räumlichen Ebene. Hierbei wird jeweils die Theorie der ausgewählten Methoden sowie das methodische Vorgehen bei der Modellierung erklärt.

Im Teil III wird das Fallbeispiel zum KEP-Markt in Berlin vorgestellt. Zunächst wird der Untersuchungsgegenstand *KEP-Verkehr in urbanen Räumen* definiert (siehe Kapitel 4). Hierbei wird der KEP-Verkehr zu den weiteren Güterverkehrsmärkten Stückgut- und Ladungsverkehr abgegrenzt. Ferner wird die Relevanz des KEP-Verkehrs in den ausgewählten Untersuchungsräumen – den Städten – herausgestellt. In Kapitel 5 wird der Kopplungsansatz mathematisch formalisiert. Darauf aufbauend wird die Parametrisierung des Gesamtmodells in Kapitel 6 vorgestellt. Die Kalibrierungsergebnisse werden in Kapitel 7 aufgezeigt und im Detail diskutiert. Die Kapitel 5, 6 und 7 definieren das entwickelte Basisszenario, das das grundlegende Gesamtsystem darstellt. In Kapitel 8 werden Szenarien entwickelt, die das betrachtete Gesamtsystem um ausgewählte verkehrspolitische und logistische Maßnahmen zur Regulierung des KEP-Verkehrs in Städten erweitern.

1. Einleitung
I. Theoretische Grundlagen 2. Kopplungsansatz
II. Methodische Grundlagen 3. Verwendete Modellierungsinstrumente
III. Fallbeispiel 4. Untersuchungsgegenstand 5. Formalisierung 6. Parametrisierung 7. Kalibrierung 8. Entwicklung und Definition der Szenarien 9. Auswertung der Simulationsergebnisse
10. Fazit

Abbildung 1.1.: Aufbau der Arbeit.

In diesem Kapitel werden wiederum die durchgeführten Modellierungsschritte Formalisierung, Parametrisierung und Kalibrierung der entwickelten Szenarien beschrieben.

In Kapitel 9 werden die finalen Simulationsergebnisse der entwickelten Strategischen Verkehrsprognose dargelegt, ausgewertet und diskutiert. Hierbei werden die Ergebnisse der Maßnahmenszenarien mit den Ergebnissen des Basisszenarios verglichen, um damit die Wirkungen der ausgewählten Maßnahmen auf das Gesamtsystem KEP-Verkehr in Städten aufzuzeigen. Final erfolgt in Kapitel 10 die Zusammenfassung der wesentlichen Inhalte dieser Arbeit sowie die kritische Bewertung der entwickelten Methodik.

In Abbildung 1.1 wird der Aufbau der vorliegenden Arbeit dargestellt, der das *Top-Down-Konzept* widerspiegelt. Dementsprechend wird zunächst der übergeordnete Ansatz erläutert und absteigend auf die Modellbildung und Anwendung des Fallbeispiels im Detail eingegangen.

Teil I.

Theoretische Grundlagen

2. Kopplungsansatz

Im Folgenden wird der übergeordnete Ansatz, der eine makroskopische Extrapolation mit einem mikroskopischen Verkehrsmodell rückkoppelt, erläutert. Zunächst werden die relevanten Begriffe definiert, um den konzeptionellen Ansatz erklären zu können.

2.1. Verkehrssystem

Ein Verkehrssystem besteht aus den Elementen *Verkehrsangebot* und *Verkehrsnachfrage*.

Das Verkehrsangebot umfasst alle Elemente, die eine Ortsveränderung ermöglichen. Dazu zählt die Verkehrsinfrastruktur mit ihrem zugrundeliegenden Verkehrsnetz (u. a. Straße, Schiene), ihren Verknüpfungspunkten (u. a. Bahnhöfe, Haltestellen) und Steuerungseinrichtungen (u. a. Lichtsignalanlagen, Verkehrsleitsysteme). ([61], [84, S. 1]) Neben der Verkehrsinfrastruktur bzw. den Verkehrsträgern gehören auch das Rollmaterial und die Verkehrsmittel zum Verkehrsangebot. Ferner finden unter diesem Begriff Normengefüge bzw. rechtliche Rahmenbedingungen (z. B. Verkehrsregeln, Fahrtbeschränkungen), Mobilitäts- bzw. Transport- und Reisekosten (Tarifsystem) und die Logistik zur erforderlichen Informationsübermittlung Berücksichtigung. ([61], [159, S. 381] nach [23] und [113])

Bei Personen ist eine Ortsveränderung als Folge einer Aktivität zu verstehen. Dabei erfordert die Ausübung der Aktivität einen Ortswechsel. Dementsprechend handelt es sich hierbei um realisierte Ortsveränderungen von Personen mit Quelle und Ziel, bezogen auf ein Zeitintervall und die Nutzung eines Verkehrsangebots. [61] Aktivitäten können u. a. Wohnen, Arbeiten, Ausbilden, Versorgen und Ausübung von Freizeittätigkeiten sein.

Bei Gütern handelt es sich hingegen nicht um Aktivitäten, sondern vielmehr um logistische Prozesse auf Grundlage von Entscheidungen. Diese umfassen Gewinnen, Erzeugen, Verarbeiten, Lagern, Verteilen, Entsorgen von Materialien und Produkten. Die Summe aller Ortsveränderungen stellt hierbei den Verkehr bzw. die Verkehrsnachfrage dar. Dementsprechend ist die Verkehrsnachfrage durch räumliche Verkehrsbeziehungen, Verkehrszeiten und Verkehrsmittel charakterisiert.

Die Verkehrsnachfrage kann sich hinsichtlich des Untersuchungsobjektes unterscheiden. ([61], [84, S. 1])

- Weg: Ortsveränderung von Personen
- Transport: Ortsveränderung von Gütern
- Fahrt: Ortsveränderung von Fahrzeugen

Tabelle 2.1.: Komponenten der Verkehrsnachfrage (Eigene Darstellung nach Kirchhoff [84]).

Komponenten der Verkehrsnachfrage	
Gegenstand	Personen und Güter
Verkehrsmittel	nicht motorisiert (NM): zu Fuß, Fahrrad; motorisiert (M): Krad, PKW, LKW, Taxi, Bus, Straßenbahn, U-Bahn, S-Bahn, Regionalbahn, Fernbahn, Schiff, Flugzeug
Verkehrswege	Schiene, Straße, Wasserstraße, Luftstraße
Organisationsform	Individual- (IV) und Öffentlicher Verkehr (ÖV)
Zweck	Berufsverkehr, Bildungsverkehr, Einkaufsverkehr, Freizeitverkehr, Serviceverkehr, Lieferverkehr, Ver- und Entsorgungsverkehr
Veranlassung	privater und geschäftlich, dienstlicher Verkehr
Bewegungsart	ruhender und fließender Verkehr
Länge der Ortsveränderung	Nah-, Regional- und Fernverkehr

- Beförderung: Ortsveränderung von Personen in Fahrzeugen/Flugzeugen

Die Verkehrsnachfrage differenziert sich nach Kirchhoff [84, S. 2] in acht verschiedene Komponenten (siehe Tabelle 2.1).

Die Akteure im Verkehrssystem sind

- die Öffentliche Hand als Eigentümer der Verkehrsinfrastruktur mit der Verantwortung für ein ausreichendes Infrastrukturangebot sowie als Aufgabenträger des Öffentlichen Verkehrs mit der Verantwortung für ein ausreichendes Beförderungsangebot im Öffentlichen Verkehr (ÖV),
- Betreiber des Öffentlichen Personenverkehrs und des Güterverkehrs als Erbringer von Beförderungs- und Transportleistungen,
- Reisende im Personenverkehr als Nutzer des Straßennetzes im Individualverkehr (IV) und des Beförderungsangebots im ÖV sowie
- Versender und Empfänger als Nutzer des Transportangebots im Güterverkehr.

2.2. Verkehrsmodell

Ein *Modell* ist eine zweckdienliche Vereinfachung des realen Systems. Abhängig vom jeweiligen Modellierungszweck werden die relevanten Aspekte und Zusammenhänge dargestellt und beschrieben. Ein Modell stellt dabei immer nur einen bestimmten Ausschnitt bzw. eine Abstraktion der Realität dar ([159, S. 381] nach [19, S. 50] und [113]).

Dahingehend ist ein *Verkehrsmodell* ein Modell zur vereinfachten Abbildung eines Verkehrssystems.

Das Verkehrssystem mit seinen Komponenten Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage stellt dementsprechend die Grundlage für ein Verkehrsmodell dar. Weiterer Zweck eines Verkehrsmodells ist die Simulation und Bewertung der Wirkungen von Maßnahmen. Die Auswirkungen auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer und -ströme können damit abgeschätzt werden. Diese Maßnahmen werden von den politischen Bereichen Stadtentwicklung, Verkehrsinfrastrukturplanung, Ordnungspolitik und Verkehrsorganisation vorgegeben ([159, S. 382f.] nach [149]). Diese Modelle dienen zur Unterstützung für Entscheidungsfindungsprozesse in der Verkehrspolitik.

Zusammenfassend werden Verkehrsmodelle herangezogen, um Vorhersagen zu Maßnahmenwirkungen als Basis für konkrete Entscheidungen im Planungsprozess zu treffen und eine realitätsnahe Darstellung der konkreten Abläufe zur Verfügung zu stellen. Hierbei soll die Verkehrsnachfrage erklärt und prognostiziert sowie die erwarteten Reaktionen der verschiedenen Verkehrsteilnehmer auf Maßnahmen abgeschätzt werden. ([159, S. 383] nach [75])

2.3. Charakterisierung von Verkehrsmodellen

Verkehrsmodelle können anhand spezifischer Charakteristika differenziert werden. Bereits in Thaller et al. [162] und Frey et al. [55] werden die folgenden Eigenschaften bestimmt und im Detail beschrieben.

- Modellobjekt bzw. Messgröße
- Aggregationsniveau
- Analysemaßstab bzw. Detaillierungsgrad
- Räumliche Betrachtungsebene
- Zeitlicher Betrachtungshorizont

Modellobjekt bzw. Messgröße Das *Modellobjekt* bzw. die *Messgröße* ist ein Kriterium, anhand dessen sich Verkehrsmodelle differenzieren lassen ([159] nach [99, 104]). Modellobjekte können dabei entweder Verkehrsflüsse oder einzelne Fahrten sein. Hybride Modelle berücksichtigen sowohl Flüsse als auch Fahrten. Flussbasierte Modelle setzen den Fokus auf die Ursachen der erzeugten Verkehre, u. a. der Verkehrsbedarf von einzelnen Verkehrszellen auf Basis von ökonomischen Aktivitäten. Basierend auf den Interaktionen zwischen den Verkehrszellen wird der Verkehrsbedarf in Verkehrsströme transformiert und als Belastungen des Verkehrsangebots dargestellt. Dieser Ansatz findet vornehmlich zur Abbildung des Verkehrsaufkommens und der Verkehrsmittelaufteilung (Modal-Split) zwischen den verschiedenen Verkehrsträgern Anwendung. Diese Modelle werden hauptsächlich für großräumige Untersuchungsräume (u. a. auf nationaler und internationaler Ebene) eingesetzt. Die Größe der Verkehrszellen ist dabei an die

Größe des Untersuchungsraums gebunden. ([159] nach [169, S. 311]) Die Datenbasen für flussbasierte Modelle sind statistische Zusammenhänge zwischen dem Verkehrsaufkommen und strukturellen Indikatoren von einzelnen Verkehrszellen.

Bei fahrtenbasierten Modellen wird auf Basis struktureller Merkmale der betrachteten Akteure das Verkehrsaufkommen erzeugt ([159] nach [169]). Die Modellierung bezieht fahrzeugbezogene Kennwerte zur Generierung der einzelnen Fahrten eines Fahrzeugs im Untersuchungsraum mit ein. Sie dienen zur Abbildung räumlich und zeitlich differenzierter Fahrzeugbewegungen. Da die fahrtenbezogenen Modelle direkt die Verkehrsnachfrage — differenziert nach Verkehrsmittelaufteilung und Fahrzeugtyp — generieren, benötigen sie keine explizite Modellierung des Modal Splits. Dabei liegt der Fokus eher auf der Betrachtung eines Verkehrsträgers (z. B. Straße) in kleineren Untersuchungsräumen, insbesondere in regionalen und urbanen Räumen. ([159, 162] nach [94, 106])

Hybride Modelle berücksichtigen beide Modellobjekte, Flüsse und Fahrten. Auf Basis der Verkehrsströme generieren sie individuelle Fahrten [9]. Diese Ansätze sind vornehmlich mikroskopische Modelle, die Entscheidungsprozesse von verschiedenen Akteuren im System abbilden.

Aggregationsniveau Das *Aggregationsniveau* ist bei einem Modell entweder aggregiert oder disaggregiert. In aggregierten Modellen ist der Untersuchungsraum in Verkehrszellen bzw. in Zonen eingeteilt. Die Verkehrsnachfrage wird für jede Verkehrszelle generiert. Dazu sind Strukturdaten auf der Ebene der Verkehrszellen sowie Daten zum Verkehrsverhalten notwendig. ([162] nach [106]) Im Fokus der Analyse stehen die Verkehrsströme sowie die Struktur und Dynamik der Verkehrserzeuger. Die statistischen Daten können in unterschiedlichen Aggregationsstufen vorliegen (u. a. bezogen auf eine Stadt, ein Bundesland). Aggregierte Modelle sind in diesem Kontext immer makroskopisch ([162] nach [98]).

Bei disaggregierten Verkehrsmodellen liegt der Schwerpunkt auf den Individuen innerhalb des Untersuchungsgebietes. Das Verhalten der einzelnen Akteure im System wird abgebildet. In diesem Kontext wird die Verkehrsnachfrage von den einzelnen Akteuren im System abgeleitet. Agentenbasierte Modelle bilden eine Teilgruppe der disaggregierten Modelle. Hierbei findet eine individuelle Ableitung der Aktivitäten der Agenten statt. Damit wird das Gesamtsystem durch die Aktivitäten der einzelnen Akteure charakterisiert. ([162] nach [98, 106, 113, 127, 159]). Der Unterschied zu den aggregierten Modellen besteht darin, dass kein homogenes Verhalten aller Akteure im System vorliegt. Sie stellen die Auswirkungen von einzelnen Maßnahmen auf die Entscheidungsprozesse einzelner Akteure dar. Dies ermöglicht eine differenzierte Bewertung der Maßnahmen. ([159] nach [169, S. 312]) Diese Modelle greifen auf Originaldatensätze von statistischen Erhebungen zu, auf sogenannte disaggregierte, unverdichtete Daten. Jede Beobachtung stellt dabei ein Individuum mit seinen individuellen Entscheidungen dar. Jedoch müssen diese Modelle nicht unbedingt mikroskopisch sein, da sich die Daten auch auf ein durchschnittliches Verhalten einer verhaltenshomogenen bzw. -ähnlichen Gruppe beziehen können. Im Gegensatz dazu sind aggregierte Modelle stets makroskopisch. [162] nach [98, S. 33])

Analysemaßstab Der *Analysemaßstab* bzw. der *Detaillierungsgrad* ermöglicht eine weitere Unterteilung der Verkehrsmodelle in makro-, mikro- und mesoskopische Modelle. Makroskopische Modelle bilden auf Basis von aggregierten Daten verhaltenshomogene bzw. -ähnliche Gruppen ab. Dabei können sie nicht das Verhalten des einzelnen Akteurs beschreiben. Sie konzentrieren sich auf Verkehrsflüsse. Die Verkehrsströme werden auf den Kanten zwischen den Knoten des Infrastrukturnetzwerks abgebildet. Die Kanten können hierbei das individuelle Verhalten der einzelnen Akteure nicht berücksichtigen ([159] nach [116, S. 5f.]). Die Modelle können auf aggregierten und disaggregierten Daten basieren.

Dagegen berechnen mikroskopische Modelle die Verkehrsnachfrage des Gesamtsystems aus den Aktivitäten der einzelnen Akteure, deren Verhalten der Untersuchungsgegenstand ist. ([159, 162] nach [106, 158]). Dadurch werden Auswirkungen des Verhaltens einzelner Akteure oder der Interaktionen zwischen den Akteuren untersucht. Diese Modelle basieren auf disaggregierten Datensätzen. Falls diese nicht vorhanden sind, werden sie aus aggregierten Daten generiert. ([162] nach [98]) Die mikroskopische Modellierung weist einen hohen zeitlich und räumlich detaillierten Auflösungsgrad des Verkehrsgeschehens auf.

Ferner gibt es noch die mesoskopischen Modelle, die makro- und mikroskopische Ansätze in Kombination einsetzen.

Zusammenfassend bilden makroskopische Modelle Verkehrsflüsse ab, mikroskopische Modelle dagegen einzelne Agenten bzw. Akteure und in mesoskopischen Modellen werden Gruppen analysiert. Es kann auch eine Analogie zu makro- und mikroökonomischen Ansätzen abgeleitet werden. Die Makroökonomie untersucht das Gesamtsystem sowie das Verhalten der und die Interaktionen zwischen den Entscheidungsträgern im System (z. B. Haushalte, Ökonomie) auf aggregierter Ebene. Die Mikroökonomie analysiert dagegen das betriebswirtschaftliche Verhalten der einzelnen ökonomischen Akteure (u. a. Haushalte oder Firmen). Sie benötigen dabei disaggregierte Daten. ([159, 162] nach [63, 98])

Räumliche Betrachtungsebene Die *räumliche Betrachtungsebene* wird anhand des Untersuchungsraums festgelegt. Hierbei kann zwischen internationalen, nationalen, regionalen, urbanen und lokalen Modellen unterschieden werden.

Zeitlicher Betrachtungshorizont Bei Verkehrsmodellen kann der *zeitliche Betrachtungshorizont* unterschiedlich definiert werden. Dieser differenziert sich in kurz-, mittel- und langfristige Zeiträume. Kurzfristige Betrachtungshorizonte bilden das Tagesgeschäft bzw. tagesbasierte Aktivitäten von Akteuren im System ab. Die Zeit wird hierbei in Sekunden, Minuten, Stunden oder Tagen gemessen. Die mittelfristigen Zeiträume können in der Verkehrsplanung an eine Legislaturperiode in der Politik gebunden sein, was einem Zeitraum von 4 Jahren entspricht. Langfristige Zeiträume sind Zeithorizonte von 10 bis 15 Jahren. Für diese Zeiträume werden in der Verkehrsplanung Planungsinstrumente (z. B. Bundesverkehrswegeplan, Verkehrsentwicklungsplan einer Stadt) aufgestellt. Es handelt sich dabei um Planungsperioden zur Umsetzung von Maßnahmen.

2. Kopplungsansatz

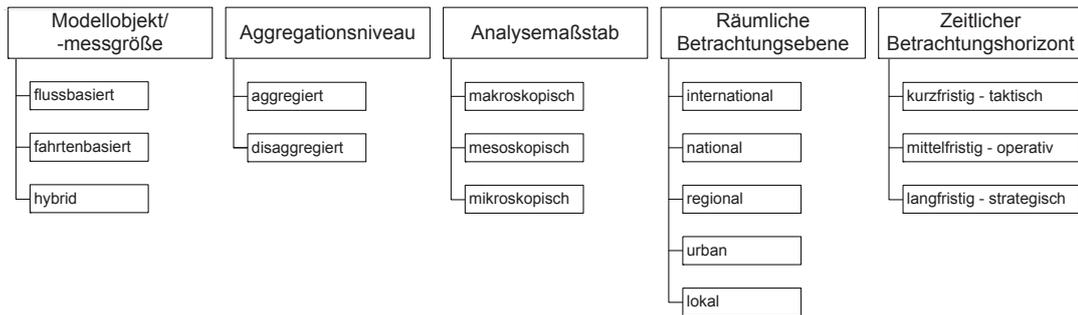


Abbildung 2.1.: Charakteristika von Verkehrsmodellen.

Auch kann eine Analogie zu taktischen, operativen und strategischen Planungshorizonten, die vornehmlich in der Wirtschaft Verwendung finden, hergestellt werden. Die taktische Ebene betrachtet das kurzfristige Tagesgeschäft. Hierbei werden die Abläufe innerhalb eines Tages und ggf. für den nächsten Tag geplant. In der operativen Ebene werden mittelfristige Entscheidungen für das Unternehmen getroffen. Hingegen bezieht sich die strategische Ebene auf die längerfristige Ausrichtung eines Unternehmens. [56, S. 61]

In Abbildung 2.1 werden die zuvor beschriebenen Modellcharakteristika im Überblick aufgezeigt.

2.4. Generalisierung des Kopplungsansatzes

Wie nach Kapitel 2.3 zu erkennen ist, existiert eine Vielzahl an Modellierungsmethoden, die jeweils für bestimmte Untersuchungsfragen geeignet sind. Insbesondere ist zu bemerken, dass makroskopische und mikroskopische Anforderungen sich diametral entgegenstehen. So bilden Erfahrungen der Akteure aus zeitlich kurzfristigen Handlungen die Basis für mittelfristige Planungen und schließlich langfristige Entscheidungen. Ebenso zeigen räumlich mikroskopische Gegebenheiten über globale Verkopplungen von Verkehrssystemen einen Einfluss auf makroskopische Maßzahlen.

Weiterhin können trotz der Diversität der Untersuchungsmethoden kaum mikroskopische Ursachen für makroskopische Beobachtungen gefunden, wie umgekehrt keine makroskopischen Effekte für mikroskopische Maßnahmen beobachtet werden.

Das wichtigste Manko der klassischen Ansätze besteht jedoch darin, dass ein Verkehrssystem nicht als dynamisch begriffen wird, das sich auch bei völligem Fehlen regulatorischer Maßnahmen und externer Eingriffe weiterentwickelt. Der Grund für diese Weiterentwicklung liegt in der Autonomie der Akteure begründet, die innerhalb eines gesetzlichen oder wirtschaftlichen Rahmens Handlungsfreiheit erlaubt. Einflüsse auf die Entscheidungen der Akteure sind dabei nicht zwingend nur verkehrssysteminhärent, sondern können ebenso aus der Abhängigkeit zu anderen Systemen folgen. Hier sind vor allem ökonomische, ökologische aber auch soziale Systeme sowie technologische Entwicklungen zu nennen.

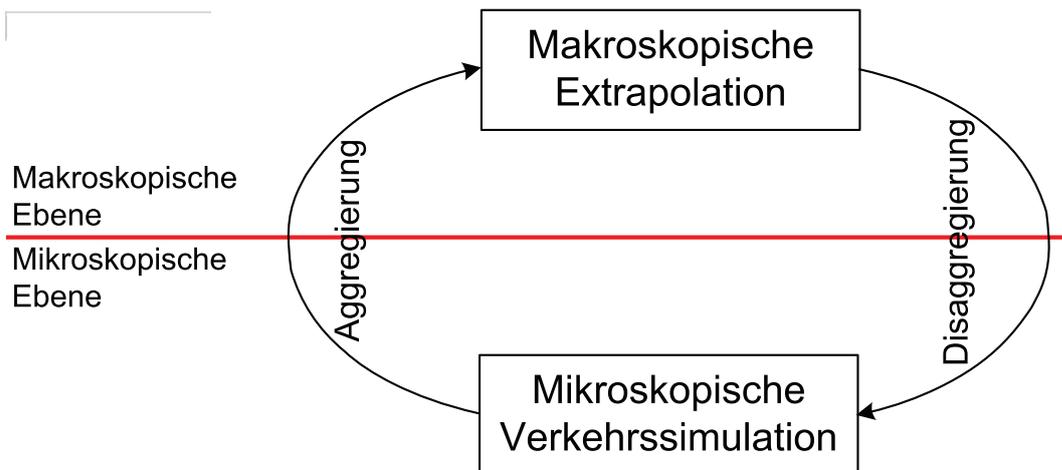


Abbildung 2.2.: Übergeordneter Kopplungsansatz.

Die Verfolgung der Dynamik eines Verkehrssystems spielt insbesondere eine Rolle, wenn Aussagen über die zukünftige Entwicklung getroffen werden sollen. Dazu ist vornehmlich die Form der Extrapolation geeignet. Die Extrapolation bezieht sich dabei sowohl auf makroskopische Kennzahlen als auch auf mikroskopische Veränderungen auf der Verkehrsinfrastruktur. Jedoch muss das Verkehrssystem mit seinen Einflussfaktoren über einen angemessenen Zeitraum beobachtet werden, damit eine Extrapolation durchgeführt werden kann. Eine mikroskopische Datenakquise verbietet sich wegen des überbordenden Aufwands sowohl für große Gebiete als auch für längere Zeiträume. Darüber hinaus muss angenommen werden, dass Extrapolations- bzw. Prognosezeiträume in der Größenordnung der operativen/mittelfristigen und strategischen/langfristigen Planungszeiträume liegen. Daher ist nur eine Makroskopische Extrapolation (MEP) möglich.

Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage bezogen auf das Verkehrsangebot im Sinne einer Mikroskopischen Verkehrssimulation (MVS) müssen aus den Daten der MEP abgeleitet werden. Die Beobachtungen aus der MVS geben Auskunft über konkrete Belastungen der Verkehrsinfrastruktur und damit auch über die Handlungen der Akteure. Deswegen müssen die Ergebnisse der MVS bei der weiteren Extrapolation berücksichtigt werden.

Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit ein Ansatz zur Kopplung einer MEP mit einer MVS verfolgt. In der Abbildung 2.2 wird dieser Ansatz aufgezeigt.

Um diese Kopplung einer MEP mit einer MVS in beide Richtungen zur gegenseitigen Anpassung zu erlauben, sind die Schritte *Disaggregation* und *Aggregation* vorzunehmen. Die Disaggregation dient dazu, aggregierte Daten zu Modellierungsobjekten sowie deren Merkmalen und Merkmalsausprägungen zu kleineren Gruppen oder auch einzelnen Bestandteilen aufzuteilen. Die aggregierten Daten stellen dabei die Randsummen bzw. -verteilung dar, auf deren Basis einzelne Modellierungsobjekte generiert werden. Die einzelnen Objekte entsprechen der aggregierten Verteilung. [55, 162] Im vorliegenden Kopplungsansatz wird die Disaggregation von der MEP zur MVS durchgeführt,

um aus Aggregatzuständen in der MEP einzelne Verkehrsteilnehmer in der MVS zu erzeugen. Diese Aggregatzustände der MEP müssen durch ausgewählte Verteilungsverfahren (u. a. Monte-Carlo-Simulation, Entropiemaximierung, Zufallsverteilung) auf die räumliche Ebene in der MVS verteilt werden.

Die Aggregation ist als die Zusammenfassung einzelner Größen zu einer Gesamtgröße definiert. Dies bedeutet, dass erhobene Daten, die zunächst in disaggregierter Form vorliegen, zu aggregierten Messgrößen zusammengefasst werden. Die Aggregation wird im vorliegenden Kopplungsansatz herangezogen, um die in der MVS erhobenen Daten zu Aggregaten für die MEP aufzubereiten. Die in der MVS erhobenen Daten sind dabei einzelne Messgrößen, die das räumlich und verkehrlich beeinflusste Verkehrsverhalten der einzelnen Verkehrsteilnehmer im Untersuchungsraum abbilden. Die erzeugten Aggregate bilden die Grundlage für weitere Prognosen mittels der MEP.

2.5. Systemarchitektur

Im Folgenden wird der in Kapitel 2.4 beschriebene Ansatz in eine computergestützte, automatisierte Anwendung überführt sowie dessen Bestandteile und Funktionsweise im Detail erläutert.

MVS Zunächst wird der Zweck und die Funktionsweise einer *MVS* aufgezeigt. Die *MVS* soll das Verkehrssystem auf räumlicher Ebene in einem kurzfristigen Betrachtungshorizont abbilden bzw. simulieren. Die Auswahl der *MVS* ist dabei abhängig von der Problemstellung bzw. dem Forschungszweck. Dementsprechend können je nach Anforderung fluss-, fahrzeugbasierte oder hybride Modellierungsansätze als *MVS* herangezogen werden.

Raumbezogenen Daten Um die *MVS* initialisieren zu können, werden *raumbezogenen Daten* zum betrachteten Verkehrssystem des Untersuchungsraumes benötigt. Dementsprechend wird das Verkehrssystem, bestehend aus Verkehrsangebot und -nachfrage einmalig erhoben. In Abhängigkeit der ausgewählten *MVS* können sich die zu erhebenden Daten unterscheiden. Je nach Fragestellung sind ausgewählte Elemente des Verkehrsangebots mit den jeweiligen Merkmalen, die bereits in Kapitel 2.1 aufgezeigt wurden, zu erheben. Ferner sind die jeweiligen Entitäten Grundlage zur Initialisierung der Verkehrsnachfrage. Unter Entitäten werden in diesem Kontext die Komponenten der Verkehrsnachfrage (siehe Tabelle 2.1 in Kapitel 2.1) verstanden. Dazu zählen insbesondere die Quellen und Senken der Verkehrsnachfrage, die zu befördernden Gegenstände und die verwendeten Verkehrsmittel mit ihren jeweiligen Eigenschaften. Bei flussbasierten Modellen stellen Verkehrszellen mit ihren jeweiligen Eigenschaften die Quellen und Senken der Verkehrsflüsse dar. In diesem Fall werden die Verkehrszellen nach ihren jeweiligen Flächennutzungen charakterisiert. Hingegen werden bei fahrzeugbezogenen bzw. agentenbasierten Modellen die Quellen und Senken als Standorte aufgezeigt. Ferner werden die Entitäten, ob nun in fluss- oder agentenbasierten Ansätzen, nach ihren

Merkmale charakterisiert. In der Personenverkehrsmodellierung erhalten beispielsweise Personen einen Wohnstandort, von dort sie ihre Tagesfahrt starten. Diese weisen jeweils unterschiedliche Charakteristika auf, u. a. soziodemographische und -ökonomische Merkmale, PKW-Besitz, ÖPNV-Zeitkarte und Aktivitätsmuster.

MEP Die *MEP* findet zur makroskopischen Analyse von Aggregaten ohne räumlichen Bezug, die einer zeitlichen Entwicklung unterworfen sind, Verwendung. Dementsprechend werden diese Aggregate auf makroskopischer Ebene innerhalb eines langfristigen Betrachtungshorizonts extrapoliert. Demzufolge können Prognosen durchgeführt werden. Sie wird über Extrapolationsfunktionen formalisiert, die wiederum je nach Forschungszweck und Fragestellung ausgewählt werden können. Bei einer begrenzten Anzahl an betrachteten Aggregaten können lineare Regressionen als Extrapolationsfunktionen zum Einsatz kommen. Bei komplexen, großen Systemen mit einer hohen Anzahl an betrachteten Größen, die miteinander in Verbindung stehen, sind Differentialgleichungssysteme zu empfehlen. Die MEP besteht einerseits aus aggregierten Verkehrskenngrößen und andererseits aus externen Rahmenbedingungen. Hierbei wird die zeitliche Entwicklung der verkehrsimmanenten Kenngrößen beschrieben. Diese Verkehrskenngrößen sind von externen Rahmenbedingungen abhängig, die nicht verkehrsinhärent sind. Die Rahmenbedingungen sind demnach als externe Einflussysteme auf das Verkehrssystem zu verstehen.

Rahmenbedingungen Im Rahmen der Modellbildung der MEP werden neben den betrachteten, aggregierten Verkehrskennzahlen auch externe *Rahmenbedingungen*, die maßgeblich auf das untersuchte Verkehrssystem einwirken, berücksichtigt. Diese Rahmenbedingungen unterliegen dabei einer zeitlichen Entwicklung und werden in aggregierter Form betrachtet. Eine zeitliche Entwicklung dieser Rahmenbedingungen in der MVS ist nicht möglich oder verbietet sich auch. Hierbei kann es sich beispielsweise um soziale, ökonomische, ökologische, politische und technische Rahmenbedingungen handeln. Soziale Rahmenbedingungen können in diesem Kontext die Bevölkerung und deren soziodemographische und -ökonomische Merkmale sein. Ökonomische Rahmenbedingungen sind Entwicklungen gesamter Volkswirtschaften oder spezifischer Märkte, die nicht Bestandteil des Verkehrssystems sind, jedoch auf die Entwicklung dieses Einfluss haben. Zudem fallen unter ökonomische Rahmenbedingungen Marktpreisentwicklungen. Politische Rahmenbedingungen können regulatorische Maßnahmen zur Beeinflussung des Verkehrsverhaltens mittels Bepreisungsinstrumenten sein. Diese Instrumente sind einer zeitlichen Entwicklung unterworfen. Hierbei ist beispielsweise die Autobahn-Maut zu nennen, deren Preis seit der Einführung stetig angestiegen ist. Auch City-Mautkonzepte sind im europäischen Ausland (u. a. Stockholm) im Einsatz. Diese Art von Regulierungen haben dabei einen Einfluss auf die Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer auf infrastruktureller Ebene. Auch technische Entwicklungen stellen externe Rahmenbedingungen zum Verkehrssystem dar. Hinsichtlich der Elektromobilität hängt beispielsweise die Einführung der Elektrofahrzeuge in das Verkehrsgeschehen von der Marktreife (u. a. Serienproduktion), Kaufpreisentwicklung, Batteriepreisentwicklung und der Entwicklung

der Leistungsfähigkeit der Batterie, aber auch vom Ausbau der Ladestationen ab. Eine zeitliche Funktion der Rahmenbedingungen kann den einzelnen Entitäten in der MVS nicht zugewiesen werden. Aus diesem Grund müssen die zeitlichen Entwicklungen dieser Rahmenbedingungen auf makroskopischer Ebene in aggregierter Form mittels der MEP betrachtet werden.

Parameter Die MEP besteht aus Extrapolationsfunktionen. Die *Parameter* dieser Funktionen müssen zunächst mittels Sekundärdatenerhebung erhoben werden. Dabei handelt es sich um historische Zeitreihenwerte. Diese *Parameter* werden auf historischen Daten kalibriert, um die Verhaltensgültigkeit der Extrapolation zu gewährleisten. Dies bedeutet, dass die Simulationswerte auf historische Werte trainiert werden. In diesem Kontext ist darauf zu achten, dass die historischen Zeitreihenwerte ausreichend weit in die Vergangenheit reichen, dass die aktuelle und zukünftige Entwicklung des betrachteten Zeithorizonts davon noch beeinflusst wird. Damit kann die Validität bzw. Aussagekraft der Zukunftsprognose erhöht werden. Mittels der Kalibrierung ergeben sich plausible, stabile Simulationswerte als Basis für langfristige Prognosen.

Aggregation In der Schnittstelle *Aggregation* werden die einzelnen Messgrößen, die mittels der MVS erhoben wurden, zusammengefasst. Hierbei werden vornehmlich Verkehrskennwerte für die MEP aufbereitet, die das Verkehrssystem beschreiben. Dabei handelt es sich um Kennwerte zur Verkehrsnachfrage sowie deren Charakteristika, die von räumlichen und infrastrukturellen Gegebenheiten sowie dem Verkehrsgeschehen abhängig sind. Diese Kennwerte mit räumlichen und verkehrlichen Bezug sind beispielsweise Fahrtenmuster des Personenverkehrs oder Tourencharakteristika des Güterverkehrs. In einer agentenbasierten MVS werden beispielsweise die Fahrten der Agenten mit ihren jeweiligen Fahrtenmustern erhoben, die zunächst in disaggregierter Form je Entität vorliegen. Dabei handelt es sich beispielsweise um die zu erreichende Geschwindigkeit auf dem Infrastrukturnetz, Anzahl der durchgeführten Fahrten, zurückgelegte Distanzen und Fahrzeiten sowie Anzahl der Stopps. In der Aggregation werden die disaggregierten Daten zu Durchschnittswerten zusammengefasst. Diese Durchschnittswerte stellen nun aggregierte Messgrößen zur Analyse des Verkehrssystems zu einem bestimmten Zeitpunkt dar. Diese Messgrößen werden zur Fortschreibung dieser in der MEP herangezogen. Diese Messgrößen sind zwar auch Bestandteil der MEP, sind jedoch nur als Konstanten ohne räumlichen Bezug und zeitliche Entwicklung in der MEP integriert. Demzufolge kann damit die MEP durch die räumlich und verkehrlich abhängigen Messgrößen, die einer Begrenzung auf räumlicher Ebene unterworfen sind, stabilisiert werden. Die Aggregation ist variabel in Abhängigkeit der MEP.

Disaggregation In der Schnittstelle *Disaggregation* werden ausgewählte aggregierte, extrapolierte Rahmenbedingungen der MEP zu Modellierungsobjekten sowie deren Merkmalen auf kleinere Gruppen oder einzelne Entitäten in der MVS verteilt. Einerseits werden aus Aggregatzuständen der MEP die Entitäten im Verkehrssystem auf räumlicher Ebene der MVS erzeugt bzw. fortgeschrieben. Andererseits werden die externen

Rahmenbedingungen, denen die betrachteten Entitäten der MVS unterworfen sind, an die Entitäten verteilt. Diese ausgewählten aggregierten Rahmenbedingungen sind demzufolge einer zeitlichen Entwicklung unterworfen und dienen vornehmlich der Initialisierung der MVS. Dabei können verschiedene Verteilungsverfahren (u. a. Zufallsverteilung, Normalverteilung, Monte-Carlo-Simulation, Entropiemaximierung) Verwendung finden. Die Disaggregation ist hierbei variabel in Abhängigkeit der MVS, da verschiedene MVS einen unterschiedlichen Datenbedarf zur Initialisierung der Simulation haben. Jedoch können die notwendigen *raumbezogenen Daten* der MVS als Orientierung herangezogen werden.

Mittels des computergestützten Rückkopplungsansatzes wird der Simulationskreislauf zwischen MVS und MEP mit den jeweiligen Aggregierungs- und Disaggregierungsschnittstellen iterativ und automatisiert ausgeführt, um eine Langzeitprognose mit räumlichen Bezug zu erlauben.

Dieses automatisierte Rückkopplungsverfahren dient einerseits zur Stabilisierung der Makroskopischen Extrapolation durch die Begrenzung auf räumlicher Ebene und andererseits zur Fortschreibung der raumbezogenen Daten der MVS mittels der MEP. Zudem werden valide, langfristige Prognosen durch die Kalibrierung der MEP gewährleistet.

In Abbildung 2.3 wird die Systemarchitektur des entwickelten Kopplungsansatzes aufgezeigt. Dabei werden die Recheneinheiten (MEP, MVS) in Kreisen, die Daten in Rechtecken und der Datentransfer in Pfeilen dargestellt. Die beiden zuvor gezeigten Ebenen, makroskopische und mikroskopische Ebene, sind wiederum durch eine rot markierte Trennlinie voneinander abgegrenzt. Die Schnittstellen *Aggregation* und *Disaggregation* werden über je einen zu entwickelnden Adapter ausgeführt. In diesem Kontext ist zu erwähnen, dass nicht dieselben Daten jeweils aggregiert und disaggregiert werden.

Im Ergebnis ermöglicht dieser Ansatz einerseits mittel- und langfristige Prognosen zur Verhaltensänderung des gesamten Verkehrssystems auf makroskopischer Ebene mittels der MEP. Andererseits erlaubt er die räumliche bzw. netzbezogene Betrachtung des Verhaltens und der Entscheidungen der Individuen im Verkehrssystem im Detail auf mikroskopischer Ebene mittels der MVS. Zudem wird in gleichem Maße die Prognosefähigkeit der MEP und die detaillierte, räumliche Auflösung der MVS genutzt. Somit verbessern und ergänzen sich diese beiden Instrumente gegenseitig. Mittels dieser Rückkopplung zwischen den zwei Methoden wird die Dynamik eines Verkehrssystems auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene abgebildet.

Dieser generelle Ansatz ist in diesem Zusammenhang nicht an spezifische Untersuchungsobjekte, zeitliche Betrachtungshorizonte und räumliche Ebenen gebunden. Damit können eine Vielzahl an Modellierungszwecke und Fragestellungen in der Verkehrsforschung untersucht werden. Demnach können sowohl Personen- (MIV, NMIV, ÖV) als auch Güterverkehre analysiert werden. Je nach Bedarf können verschiedene Verkehrsträger einbezogen werden. Falls die Forschungsfrage auf bestimmten Akteuren liegt, können die einzelnen Verkehrszwecke genauer beleuchtet werden. Nichtsdestotrotz ist es möglich, die Interaktionen und Wechselwirkungen verschiedener Akteure im System zu studieren.

Neben der thematischen Schwerpunktsetzung ist dieser generelle Kopplungsansatz

nicht an spezifische, methodische Instrumente gebunden. Hierbei können je nach Zweck und Sinnhaftigkeit verschiedene Extrapolatoren als MEP und dementsprechend auch verschiedene, traditionelle Verkehrsmodelle als MVS ausgewählt werden.

Nach eigenen Recherchen und Wissensstand wurde bislang im bisherigen Stand der Forschung kein derartiger Kopplungsansatz verfolgt. Dementsprechend handelt es sich um einen neuartigen, rückgekoppelten Ansatz zwischen einer MEP und einer MVS. Zur Extrapolation wurde der methodische Ansatz System Dynamics, zur mikroskopischen Verkehrssimulation hingegen die agentenbasierte Verkehrssimulation MATSim von Balmer et al. [8] und Schröder et al. [140] ausgewählt.

Es wurden zwar ähnliche rückgekoppelte Ansätze zwischen MEP und MVS von Kraft et al. [86] und Kuchenbecker [91] umgesetzt. Auch diese nutzen zur Extrapolation System Dynamics. Grundlegend unterscheiden sie sich jedoch im Vergleich zum vorliegenden Ansatz hinsichtlich des verwendeten räumlichen Verkehrsmodells. Sie nutzen dabei ein makroskopisches Verkehrsmodell, das zwischen Verkehrszellen erzeugte Verkehrsflüsse auf infrastruktureller Ebene abbildet. Dementsprechend wurde bisher keine Kopplung einer MEP mit einem mikroskopischen, disaggregierten Verkehrsmodell, das Entscheidungen von einzelnen Akteuren im System abbilden kann, entwickelt.

Im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) geförderten Projektes „Nachhaltiger Güterverkehr in urbanen Räumen — Wirkungsabschätzung mittels systemdynamisch basierter Güterverkehrsmodelle“ (GZ: CL 318/15-1) wurde der vorliegende Kopplungsansatz am Institut für Transportlogistik der Technischen Universität Dortmund, unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Uwe Clausen, entwickelt. In dem gemeinsamen DFG-Projekt mit dem Lehr- und Forschungsgebiet für Güterverkehrsplanung und Transportlogistik der Bergischen Universität Wuppertal, unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Leerkamp, verfolgt der Forschungspartner die Kopplung einer MEP mit einem makroskopischen, flussbasierten Verkehrsmodell.

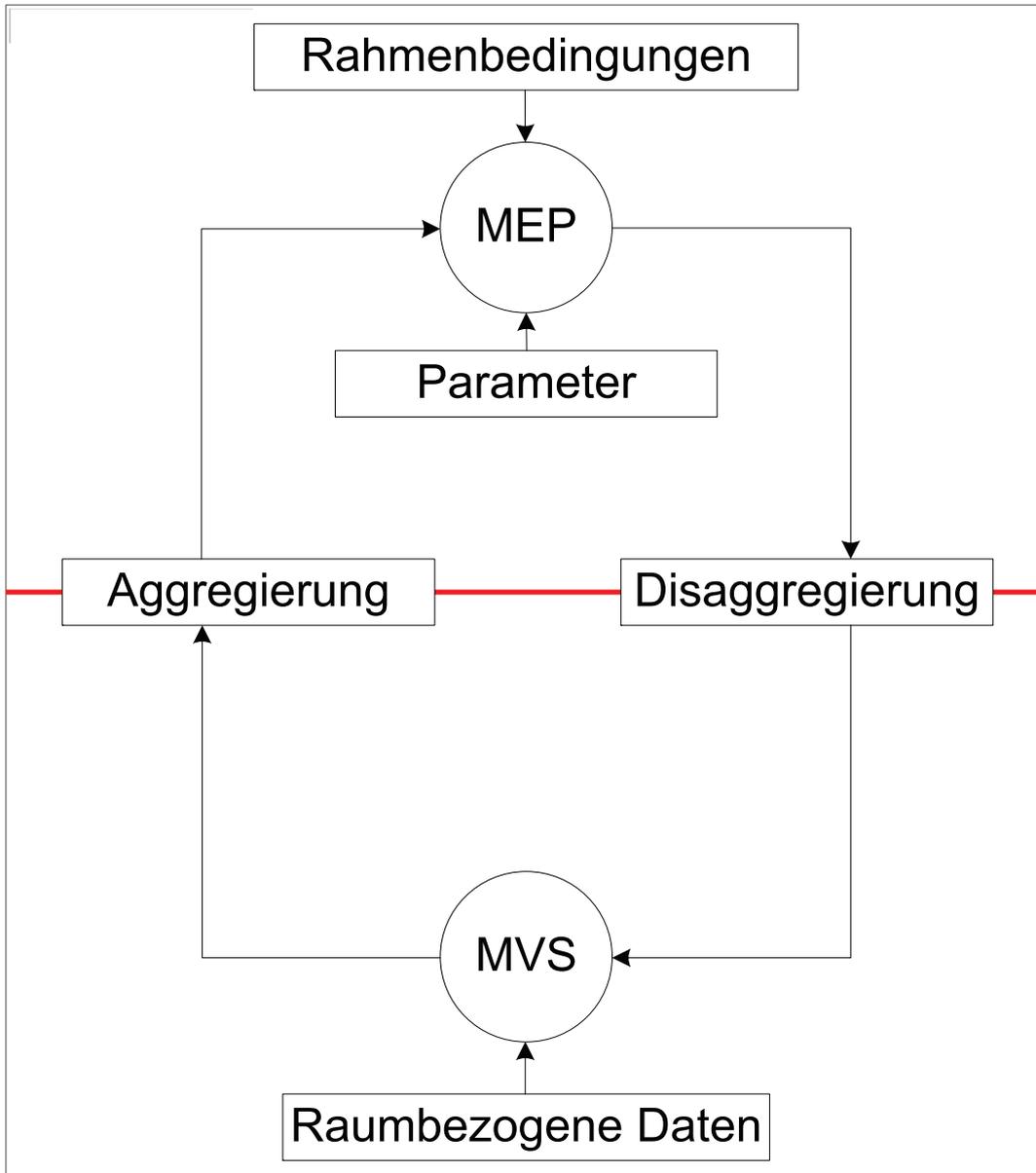


Abbildung 2.3.: Computergestützte, automatisierte Anwendung des Rückkopplungsansatzes.

Teil II.

Methodische Grundlagen

3. Verwendete Modellierungsinstrumente

Nachdem in Kapitel 2 der übergeordnete Ansatz aufgezeigt und im Detail erläutert wurde, wird nun im folgenden Abschnitt die Auswahl der konkreten Modellierungsinstrumente vorgenommen. Es muss sowohl die MEP als auch die MVS konkretisiert werden.

Nach der Definition einer MEP ist es notwendig, ein Modellierungsinstrument zu identifizieren, das

- Hochrechnungen bzw. Prognosen für einen mittel- und langfristigen Betrachtungshorizont,
- Analysen eines Gesamtsystems und
- Untersuchungen der Wechselwirkungen der Teilsysteme erlaubt.

Hierbei gibt es im Stand der Forschung diverse makroskopische Ansätze, u. a. die lineare Regression, die zwar eine Hochrechnung einer begrenzten Anzahl an betrachteten Variablen ermöglichen, jedoch die Bestandteile und ihre Abhängigkeiten zueinander innerhalb eines Gesamtsystems nicht abbilden können. Dagegen gibt es systemische Ansätze, die Ursache-Wirkungszusammenhänge innerhalb eines Systems abbilden sowie in quantitativer Form Prognosen für längere Zeithorizonte durchführen (u. a. System Dynamics). Auf Grundlage von Differentialgleichungssystemen können diese Ansätze komplexe, große Systemen mit einer hohen Anzahl an betrachteten Größen, die miteinander in Verbindung stehen, im Rahmen von Langzeitprognosen analysieren.

Aufgrund dessen dient die Methodik System Dynamics zur Beschreibung der internen Strukturen komplexer Systeme und zur Generierung quantitativer Aussagen zur zeitlichen Entwicklung dieser Systeme. Diese systemische Modellierungsmethode wurde in verschiedenen Forschungsdisziplinen angewandt und ist bereits in der Verkehrsforschung etabliert. (siehe Kapitel 3.1)

Hingegen muss die MVS für den vorliegenden Kopplungsansatz folgende Eigenschaften erfüllen.

- Abbildung des Verhaltens heterogener Individuen im System
- Darstellung individueller, kurzfristiger Entscheidungsprozesse auf der räumlichen Ebene

Wie bereits in Kapitel 2.3 erwähnt wurde, eignen sich besonders agentenbasierte Modellierungsansätze, um diese Vorgaben zu erfüllen. Als MVS wird für den zu entwickelnden Rückkopplungsansatz das von Balmer et al. [8] entwickelte MATSim (Multi Agent Transport Simulation Tool) genutzt. Dieses Modell bietet die Möglichkeit, neben dem MIV

auch den Güterverkehr mittels des integrierten Logistikmoduls Jsprit nach Schröder et al. [140] abzubilden. Zudem muss bei der Kopplung der MEP mit einer MVS darauf geachtet werden, dass eine offene Schnittstelle zur Erweiterung der MVS existiert und der Quellcode frei verfügbar ist. Aufgrund dessen wird MATSim/Jsprit als Referenzmodell zur Durchführung zeitpunktgenauer Prognosen auf disaggregierter, räumlicher Ebene herangezogen.

Nun werden die ausgewählten Modellierungsinstrumente System Dynamics und agentenbasierte Verkehrssimulation im Detail erörtert.

3.1. System Dynamics Modellierung

In diesem Abschnitt wird die SD-Modellierung zunächst theoretisch fundiert dargestellt. Danach erfolgt die Beschreibung des Vorgehens in der SD-Modellierung. Abschließend werden ausgewählte SD-Ansätze mit Bezug zum Thema Verkehr beleuchtet.

3.1.1. Theorie

In der Realität gibt es keine Systeme, die nicht dynamisch sind, auch wenn sie zunächst statisch wirken. Dies liegt daran, dass jegliche Systeme über die Zeit altern oder sich durch Belastung dynamische Lasten ergeben. Dementsprechend werden Systeme als dynamische Systeme definiert, wenn sich der Systemzustand in einem betrachteten Zeitraum verändert und dieser demzufolge dynamisches Verhalten zeigt. [19, S. 36]

Aufgrund dessen dient der SD-Ansatz zur Erklärung komplexer, dynamischer Systeme und ihrer Entwicklung im Zeitverlauf. In diesem Zusammenhang wird ein in seiner Zusammensetzung kompliziertes System, das seinen Zustand im Zeitverlauf ändert, als komplex bezeichnet. Gerade in großen Systemen, die sich durch eine hohe Anzahl und Vielfältigkeit an Systemelementen auszeichnen, verändern sich die Zustände dieser Elemente innerhalb einer betrachteten Zeitspanne durch die Beziehungen untereinander. Dabei gewinnt gerade die zeitliche Funktion an Relevanz. Die *Dynamik* bedeutet hierbei, dass sich das System und seine Elemente bei fortschreitender Zeit verändert. [78] Die SD-Modelle bilden dabei die reale Welt in abstrakter Form auf aggregierter Ebene ab.

Dementsprechend ist das wesentliche Merkmal eines SD-Modells, dass

- die Strukturen des betrachteten Systems bestehen bleiben,
- sich jedoch der Zustand dieses Systems im Zeitverlauf verändert.

Die SD-Modellierung wurde von Jay W. Forrester [49, 50] entwickelt. Grundlagen für sein erstes SD-Modell *Industrial Dynamics* sind die Systemtheorie [12, 13, 14] und die Kybernetik [171]. Im Forschungsfokus dieses Ansatzes stehen die internen Strukturen, das Systemverhalten und die externen Wechselwirkungen oder Rückkopplungen zwischen verschiedenen Akteurssystemen. Ferner können Auswirkungen von Entscheidungsprozessen in komplexen Systemen aufgezeigt werden. Dies gelingt im Rahmen

eines iterativen Modellierungsverfahrens, das die Interdependenzen zwischen den Akteurssystemen sukzessiv identifiziert, anpasst und formalisiert. Zudem können verschiedene Randbedingungen im Simulationsprozess vordefiniert werden. [19, 79, 153, 161, 170]

Demnach werden zur Modellierung von SD-Systemelementen Rückkopplungen eingesetzt, um die Komplexität eines dynamischen Systems bewältigen zu können. Zudem muss eine zielorientierte Einflussnahme möglich sein. Basierend auf einer kontinuierlichen Simulation wird das Zeitverhalten nichtlinearer Modelle ermittelt [38]. Diese Systeme werden mittels nichtlinearer Funktionen und Differentialgleichungssysteme formalisiert. Nach Bossel [19] kann Systemverhalten nur nachgebildet werden, wenn die Eigenschaften der Systemelemente sowie ihre Verknüpfungen korrekt wiedergegeben werden.

Differentialgleichungssysteme Differentialgleichungssysteme sind dynamische Systeme, die von der Zeit t abhängig sind. Hierbei handelt es sich demnach um Funktionen $\dot{y}(t) = f(y, t) = f(y(t), t)$. Demzufolge ist die Ableitung $\dot{y}(t)$ von der Funktion $y(t)$ und der Zeit t abhängig. Dabei handelt es sich um eine gewöhnliche Differentialgleichung 1. Ordnung, da nur die erste Ableitung durchgeführt wird. [133, S. 101]

Hinsichtlich numerischer Lösungsverfahren wird eine Lösung iterativ approximiert. Hierbei wird eine Lösung $y(t)$ mit dem Anfangszeitpunkt t_0 und dessen vorgegebenen Wert y_0 konstruiert. Folglich geht die Lösungskurve $y(t)$ durch den Punkt (t_0, y_0) . Damit lässt sich die Ableitung $\dot{y}(0) = \dot{y}(t_0) = f(y_0, t_0)$ zur Zeit t_0 berechnen. Voraussetzung ist demnach die Anfangszeit t_0 und der Anfangswert y_0 , um $\dot{y}(0) = \dot{y}(t_0) = f(y_0, t_0)$ zu lösen. [133, S. 103]

Zeichnet sich ein dynamisches System $\dot{y}(t)$ durch n zeitlich veränderliche Funktionen $f(y_1(t), \dots, y_n(t))$ aus, ist die zeitliche Veränderung des Systems hierbei vom Systemzustand $\dot{y}_n(t)$ abhängig. Demzufolge ist f_n eine stetig differenzierbare Funktion von n Variablen y_1, \dots, y_n . Zu jedem Anfangswert $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n) \in \mathbb{R}^n$ bei einer Anfangszeit $t_0 \in \mathbb{R}$ gibt es eine eindeutige Lösung mit diesem vorgegebenen Anfangswert ξ . \mathbb{R}^n ist als Phasenraum des Differentialgleichungssystems definiert. [133, S. 121]

Ist $\dot{y}(t) = (y_1(t), \dots, y_n(t))$ eine Lösung von $f(y_1(t), \dots, y_n(t))$, so ist $\dot{y}(t)$ eine Kurve im Phasenraum („Lösungskurve“). Ein einfaches lineares Differentialgleichungssystem lässt sich folgendermaßen formalisieren.

$$f_n(y_1, \dots, y_n(t)) = a_{n1} y_1 + \dots + a_{nn} y_n + b_n, \quad (3.1)$$

oder anders formuliert

$$\dot{\vec{y}} = a \vec{y} + \vec{b}. \quad (3.2)$$

Dieses lineare Differentialgleichungssystem hat einen konstanten Koeffizienten $a_{ij} \in \mathbb{R}$. [133, S. 122]

Differentialgleichungssysteme im Sinne der systemdynamischen Modellierung In diesem Abschnitt wird das Differentialgleichungssystem, das der systemdynamischen Modellierung zugrunde liegt, genauer erläutert. Hierbei handelt es sich um eine numerische Integration, dementsprechend um eine Lösung einer Differentialgleichung 1. Ordnung. [115, S. 357] Zu nennen sind hierbei die Integrationsverfahren nach Euler-Cauchy und Runge-Kutta. Im Sinne der systemdynamischen Modellierung findet vornehmlich die Euler-Cauchy-Integration Anwendung. Voraussetzung für diese Integration ist, dass die Zustandsraten bzw. Flussvariablen $\frac{dz}{dt}$ von $(t - \tau)$ bis t konstant auf dem Wert zu Beginn der Periode $(t - \tau)$ verbleiben. Daraus resultiert ein numerischer Fehler, da sich in der Realität Zustandsraten zwischenzeitlich verändern können. Der Fehler wird kleiner, wenn die Rechenschrittweite verringert wird. [19, S. 131]

Dazu werden die folgenden Systemelemente zur Formalisierung eines systemdynamischen Modells benötigt.

- Bestands- bzw. Zustandsvariablen z (*Stocks, Levels*)
- Zustandsraten bzw. Flussvariablen $\frac{dz}{dt}$ (*Flows*)
- Zwischen- bzw. Hilfsvariablen h (*Auxiliaries*)
- Vorgabegrößen bzw. Konstanten K (*Constants*)

Zustandsvariablen sind Speichervariablen, die sich im Simulationsprozess durch Zustandsraten bzw. Flussvariablen $\frac{dz}{dt}$ im Zeitverlauf verändern. Daher können sie nur in Abhängigkeit der Zeit t untersucht werden. Sie werden mittels Integralen formalisiert. [153] Eine Menge einer Quantität innerhalb der Zustandsvariablen ist die Integration der gesamten Flüsse $\frac{dz}{dt}$ (Flussvariablen) auf den Zustand z , wobei $\frac{dz}{dt}$ die Funktion des Gesamtflusses im Systemzustand z ist.

Der Zustand von z ändert sich zu diskreten Zeitpunkten im Zeitabstand τ . Der neue Systemzustand zum Zeitpunkt t ergibt sich aus dem alten Systemzustand zum Zeitpunkt $(t - \tau)$ und dem Nettozufluss in der Zeit zwischen $(t - \tau)$ und t . Dazu muss die Zustandsveränderungsrate $(\frac{dz}{dt})$ zum Zeitpunkt $(t - \tau)$ bestimmt werden. [19, S. 130]

$$z(t) = z(t - \tau) + \left[\frac{dz}{dt}(t - \tau) \right] \delta\tau \quad (3.3)$$

Bei kontinuierlichen Systemen, bei denen sich die Zustandsraten in jedem Augenblick ändern können, ergibt sich durch den Übergang $\tau \rightarrow dt \rightarrow 0$ der neue Zustand als Integration über die Zeit, mit $z(0)$ als Anfangswert des Zustands z zur initialen Zeit $t = 0$.

$$z(t) = z(0) + \int_0^t \left[\frac{dz}{dt}(\tau) \right] \delta\tau \quad (3.4)$$

Der Nettozufluss $\frac{dz}{dt}$ besteht hierbei aus den Zu- bzw. Abflussraten bzw. Zu- und Abflüssen zur Zeit τ und der Zeitdauer $\delta\tau$. Der Zufluss $\frac{dz}{dt}_Z$ bestimmt die wachsende Menge im Zustand. Im Gegensatz dazu sinkt die Quantität im Zustand bedingt durch den Abfluss $\frac{dz}{dt}_A$. Da es immer eine Quantität im Zustand zu einer initialen Zeit gibt, kann die Formalisierung 3.3 folgendermaßen spezifiziert werden.

$$z(t) = z(0) + \int_0^t \left[\frac{dz}{dt}_Z(\tau) - \frac{dz}{dt}_A(\tau) \right] \delta\tau \quad (3.5)$$

Demzufolge bestimmen und beeinflussen die Flussvariablen $\frac{dz}{dt}$ die Veränderung der Zustandsvariablen z für jeden betrachteten Zeitschritt τ . Sie stehen in Abhängigkeit des Systemzustands z und der Konstanten K . [53, 91] Aus diesem Grund werden die Zustandsraten auch als Flüsse bezeichnet, die Zu- und Abflüsse einer Zustandsgröße pro Zeiteinheit angeben. Die momentane Zustandsrate $\frac{dz}{dt}$ leitet sich aus der Zustandsfunktion f ab. Diese beruht auf algebraischen oder logischen Funktionen und bildet den Eingang des Integrators. Die Zustandsrate $\frac{dz}{dt}$ hat dabei immer die Dimension $\frac{\dim(z)}{\dim(t)}$. [19, S. 130] Die Flussvariablen $\frac{dz}{dt}$ können folgendermaßen formalisiert werden. [19, 53, 91]

$$\frac{dz}{dt}(\tau) = f(z, K)(\tau) \quad (3.6)$$

Zwischen- bzw. Hilfsvariablen h stellen interne Wirkungszusammenhänge dar, die mittels Konstanten, Zustands- oder auch Flussvariablen berechnet werden. Vornehmlich bestimmen und beeinflussen sie Flussvariablen und andere Hilfsvariablen. Sie werden als algebraische oder logische Funktionen formalisiert. [19, 170]

Konstanten K sind Systemparameter, die von Anfang an vorgegeben sind und sich deshalb nicht verändern. Im Sinne eines Differentialgleichungssystems handelt es sich dabei um einen konstanten Koeffizienten $a_{ij} \in \mathbb{R}$. [133, S. 122] Demzufolge stellen sie die externen Einflüsse auf das System dar und geben damit maßgeblich die Systemgrenzen des Modells vor. Diese wirken zwar auf das interne System, jedoch werden diese nicht vom System über Rückkopplungen beeinflusst. Aufgrund dessen können sie nicht verändert werden. Es handelt sich häufig um durchschnittliche Entwicklungsraten über die Zeit t .

Die Dynamik in der Modellierung resultiert aus den Rückkopplungen (*Feedback Loops*). Diese legen die Ursache-Wirkungszusammenhänge bzw. -beziehungen zwischen den Systemvariablen fest. Sie werden durch Pfeile abgebildet. Dabei definiert die Richtung des Pfeils, welche der Systemvariablen als *Ursache* und welche als *Wirkung* dieser interpretiert werden kann. Der Pfeil zeigt jeweils von der Ursache zur Wirkung hin. Diese Rückkopplungen können mit Vorzeichen hinterlegt werden, die die Art der Beziehung zwischen Ursache und Wirkung definieren. Hierbei ist zwischen gleichgerichteten und entgegengerichteten Beziehungen zu unterscheiden. Bei gleichgerichteten Beziehungen führt die Zunahme einer Systemvariablen zu der Zunahme der davon abhängigen Variablen. Die entgegengerichtete Wirkungsbeziehung entsteht, wenn eine Veränderung einer Variablen in eine bestimmte Richtung (Zu- oder Abnahme) zu der gegenläufigen Veränderung der davon abhängigen Variablen führt. Gleichgerichtete Beziehungen werden mit einem Pluszeichen, entgegengerichtete Beziehungen mit einem Minuszeichen dargestellt. Damit lässt sich die Richtung der Wirkung zwischen Systemvariablen definieren. [78] Diese Vorzeichen können sich auch auf eine geschlossene Rückkopplung beziehen. In diesem Kontext bedeuten die jeweiligen Vorzeichen, ob die Rückkopplung negativ oder positiv orientiert ist. [38]

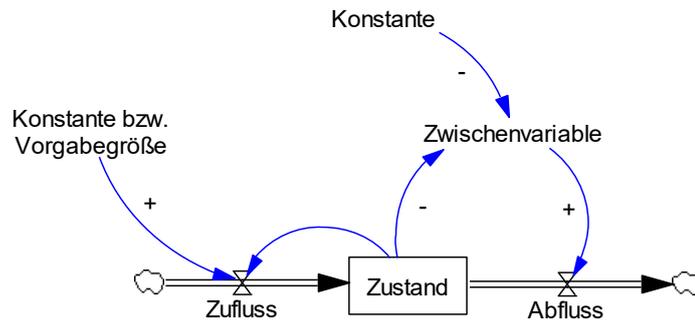


Abbildung 3.1.: Flussdiagramm eines SD-Modells (Eigene Darstellung nach [19, 153]).

Demzufolge verstärken positive Rückkopplungen die Systementwicklungen und führen zu Wachstum. Aus mathematischer Perspektive bleibt bei positiver Rückkopplung das Vorzeichen erhalten. Daraus lässt sich eine Destabilisierung des Gesamtsystems bedingt durch exponentielles Wachstum ableiten. Hingegen führt eine negative Rückkopplung zu einer gegensinnigen Veränderung. Diese negativ hemmenden Rückkopplungen sind selbstkorrigierend. Sie konterkarieren die Veränderung. Demzufolge wirken sie innerhalb des Gesamtsystems stabilisierend. Mathematisch gesehen findet in diesem Kontext ein Vorzeichenwechsel statt. [19, 153]

In der Abbildung 3.1 wird die Grundstruktur eines SD-Modells aufgezeigt [19, 153, 170].

Eine Unterteilung des Gesamtsystems in unabhängige Subsysteme bzw. Submodule wird vorgenommen, um die Komplexität dynamischer Systeme transparenter und nachvollziehbarer abbilden zu können. Dies ist ein unabhängiger Teil des Modellierungsverfahrens. Der Vorteil von Submodulen ist, dass sie unabhängig vom Gesamtsystem getestet werden können. Erst nach der Überprüfung der Submodule werden sie wieder mit dem Gesamtsystem verknüpft. [19]

Ziel der SD-Modellierung ist es, *Policies* zu bestimmen, die in Entscheidungsfindungsprozessen eine relevante Rolle spielen. Sie stellen Entscheidungsregeln dar, die in Routinen Anwendung finden. *Policies* werden informell durch die Gesellschaft und den Erwartungsdruck bestimmt oder schriftlich festgelegt. Diese lassen sich aus in der Vergangenheit getroffenen Entscheidungen und Erfahrungswerten ableiten. Bei der SD-Modellierung ist besonders darauf zu achten, die aktuell bestehenden *Policies* realitätsgetreu abzubilden. [29]

3.1.2. Methodisches Vorgehen

Im folgenden Abschnitt wird die methodische Vorgehensweise zur Entwicklung eines SD-Modells im Vergleich zu bestehenden Modellierungsverfahren nach Forrester [48, 50] und Coyle [29] diskutiert.

Ursprünglich sieht Forrester [50] ein sechs-stufiges Vorgehen vor, das durch Coyle [29] mit einem Zwischenschritt erweitert wurde. In der vorliegenden Arbeit wurde dieses Vorgehen auf elf Stufen angepasst und erweitert. Schritt 1 der SD-Modellierung sieht eine Definition des Forschungsproblems und der spezifischen Forschungsziele vor. Basierend auf einer umfassenden Literaturanalyse zum Untersuchungsgegenstand werden im Modellschritt 2 das betrachtete System und sein Verhalten zunächst umfassend beschrieben. [50, 161]. Weitere Analysen zum Stand der Forschung werden herangezogen, um die getroffenen Aussagen zu validieren. Diese ersten beiden Schritte entsprechen der Phase 1 nach Forrester [48, 50], in der das System beschrieben wird. Auf Basis dessen wird ein qualitatives Kausalkettendiagramm entwickelt, das zur Beschreibung, Erklärung und Abbildung der internen Funktionalitäten und Strukturen des Gesamtsystems und seiner Subsysteme sowie seines Systemverhaltens dient. (siehe Thaller et al. [164]) Mittels dieser Kausalkettendiagramme werden zudem die Interdependenzen zwischen allen Systemelementen modelliert und dargestellt, jedoch ohne eine mathematische Formalisierung (Schritt 3). Obwohl die Kausalkettendiagramme nicht von Forrester [48, 50] vorgeschlagen werden, führt Coyle [29] diese als Zwischenschritt ein.

Im Modellierungsschritt 4 wird das Kausalkettenmodell als Grundlage zur mathematischen Formalisierung des quantitativen SD-Ansatzes genutzt. Dabei ist einerseits eine Transformation der Kausalkettendiagramme in Flussdiagramme (*Stock-Flow-Chart*) mit ihren internen Bestandteilen Zustandsvariablen (Stocks, Levels), Flussvariablen (Flows), Hilfsvariablen (Auxiliaries) und Konstanten (Constants) notwendig. Andererseits werden die qualitativen Zusammenhänge in Differentialgleichungssysteme überführt, die die interne Struktur, das Verhalten, die Entscheidungen und die Interdependenzen zwischen den Subsystemen definieren. Dieses formalisierte Modell stellt das Basisszenario für Simulationen dar. [29, 170] Danach wird dieser quantifizierte SD-Ansatz mittels historischer Sekundärdaten für den ausgewählten Untersuchungsraum parametrisiert (Schritt 5). Dieser Modellierungsschritt wurde zusätzlich eingeführt, da der Aufwand zur Erhebung der Sekundärdatenbasis sehr zeitintensiv ist. Im Schritt 6 werden erste Simulationen mittels des Basisszenarios (Business-As-Usual) durchgeführt. Danach erfolgt die Kalibrierung des Modells anhand historischer Daten (Schritt 7). Im 8. Schritt wird die Validierung mittels Tests zur Erhöhung der Strukturgültigkeit des Modells nach Senge und Forrester [144] sowie Sterman [152] durchgeführt. Auf das methodische Vorgehen des Schrittes 7 wird im Detail in Kapitel 3.1.3 eingegangen. Die Schritte 4 – 8 entsprechen der vierten Phase – Simulation des Modells – nach Coyle [29].

Im Anschluss daran werden alternative Policies bzw. Maßnahmen in das Basisszenario implementiert (Schritt 9). Diese werden mittels empirischer Werte oder durch einen iterativen Anpassungsprozess bestimmt. Neben der Parametrisierung werden die Maßnahmenzenarien, wie bereits auch das Basisszenario, kalibriert und validiert. Danach werden die Maßnahmenzenarien simuliert. Die Simulationsergebnisse werden mit de-

nen des Basisszenarios verglichen. Somit ist eine Wirkungsabschätzung dieser Maßnahmen möglich. [161] Im Schritt 10, *Diskussion und Debatte*, arbeiten die Simulationsteilnehmer an der Konsistenzprüfung. Mittels Experteninterviews oder einem Workshop-Verfahren werden die finalen Modelle und die Ergebnisse validiert. Dieser Schritt ist der schwierigste im Projekt, da ein hohes Maß an Einstimmigkeit zu den Modellen und Simulationsergebnissen erzielt werden muss. [29] Auf diesen Schritt wird in der vorliegenden Arbeit verzichtet. Im Schritt 11 werden die Veränderungen im realen System implementiert. Die Modellierer können hier nur noch kontrollieren oder überprüfen, ob die Modellierung und die Simulationsergebnisse sinnvoll und ohne Fehler sind. Eine Identifizierung der intern oder extern induzierten Faktoren, die zu den finalen Veränderungen im realen System geführt haben, ist im Nachgang kaum möglich. [29] Dieser Modellierungsschritt wird aufgrund der Einschränkung, Verkehrsplanungsmaßnahmen innerhalb der Projektlaufzeit zu implementieren und deren Wirkungen auf das Gesamtsystem im Zeitverlauf zu überprüfen, für die vorliegende Arbeit ausgeschlossen. Zusätzlich ist es wichtig, iterative Verbesserungen und Veränderungen des Systems durch Rückkopplungsschleifen in jeder Entwicklungsstufe durchzuführen [29]. In der Abbildung 5.2 wird das eigene methodische Vorgehen zur Entwicklung des SD-Modells aufgezeigt.

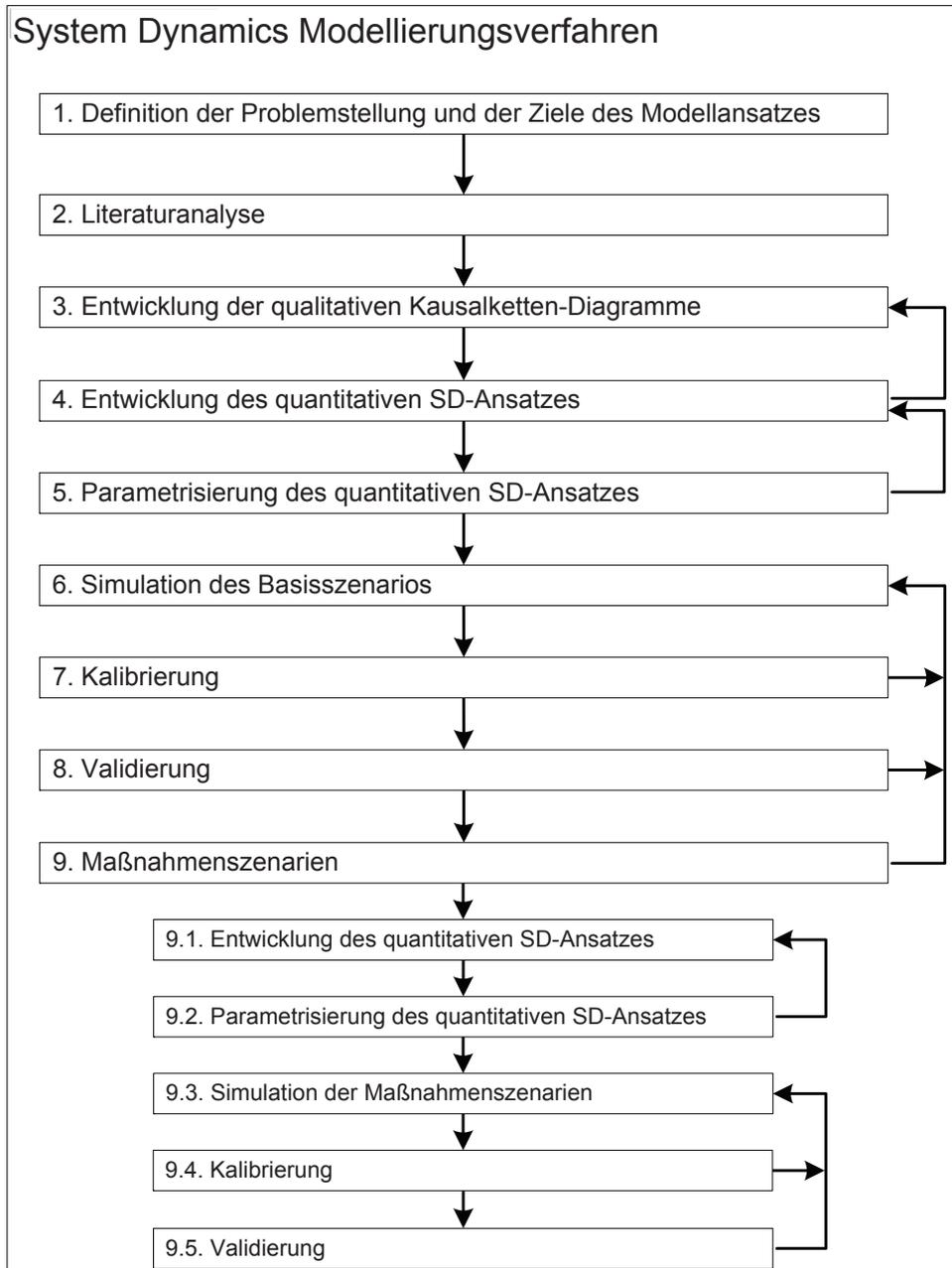


Abbildung 3.2.: Verfahren zur Entwicklung eines SD-Modells (Eigene Darstellung nach [161]).

3.1.3. Methodisches Vorgehen zur Kalibrierung des SD-Ansatzes

In diesem Abschnitt erfolgt die Beschreibung des methodischen Vorgehens zur Kalibrierung des SD-Modells. Die Kalibrierung dient zur Bestimmung optimaler Parameter zur Verbesserung der Verhaltensgültigkeit eines Modells [30, S. 2ff.]. Hierbei wird eine Suche in einem Parameterraum bzw. -intervall durchgeführt, um die beste Übereinstimmung (*Best Fit*) einer Modellvariablen zu erreichen. Dabei werden die simulierten Zeitreihenwerte dieser betrachteten Modellvariablen an die realen historischen Zeitreihenwerte angepasst. Zunächst erfolgt die Erläuterung des angewandten Kalibrierungsverfahrens nach Powell [120]. Danach werden ausgewählte statistische Maße zur Auswertung der Kalibrierung erklärt.

Kalibrierungsverfahren nach Powell (1964) In diesem Modellierungsschritt wird das Kalibrierungsverfahren nach Powell [120] angewandt, da es bereits in der verwendeten Software Vensim Ventana Inc. implementiert ist. Dieser Ansatz zählt zu den nichtlinearen Optimierungsmethoden.

Mittels dieser Methode wird eine lokale Optimallösung gesucht [167, S. 2f.].

Nach Powell [120] sind folgende Voraussetzungen bei der Anwendung nichtlinearer Gleichungen zu berücksichtigen.

- Die zu minimierende Funktion ist eine Summe von Quadraten.
- Diese Funktion neigt zu Null auf dem Minimum.
- Eine gute Annäherung an das Minimum ist bekannt.

Im Sinne der SD-Modellierung beinhaltet der Optimierungsprozess eine Bestimmung einer Maximum Likelihood Schätzung. In Vensim wird dies über die Maximierung der Payoff-Funktion erreicht. Der Maximum Likelihood Schätzer ist mit dem Chi^2 -Test gleichzusetzen. Dieser geht davon aus, dass jeder erwartete Datenwert unabhängig ist. Eine kumulierte Datenreihe würde diese Eigenschaft der Unabhängigkeit nicht ausstellen. Initial ist diese negativ und der Optimierungsprozess soll ein weniger negatives Resultat generieren. Ein idealer Payoff-Wert würde nach der Optimierung 0 sein. Eine Gewichtung in der Payoff-Funktion ist zusätzlich notwendig. Im Normalfall wird jedoch für die Kalibrierungsoptimierung die Gewichtung auf den Wert 1 gesetzt. Dieser Algorithmus wurde zunächst für Probleme konzipiert, bei denen die Zielfunktion minimiert werden sollte. Seine Verwendung auf Maximierungsprobleme wird durch Minimierung des Negativs der Zielfunktion erreicht. [30]

Der Payoff PO für die Normalverteilung ergibt sich aus der folgenden Formalisierung.

$$PO = \sum_{t=1}^n ((S_t - \bar{R}) w)^2 = \sum_{t=1}^n (E_t w)^2 \quad (3.7)$$

wobei

PO = Payoff

n = Anzahl der Beobachtungen (t=1, ..., n)

S_t = Simulationswerte zum Zeitpunkt t

R_t = Tatsächliche, reale Werte zum Zeitpunkt t

E_t = Prognosefehler bzw. Residuum zum Zeitpunkt t

w = Gewicht

Während der Kalibrierungssuche bildet Vensim die Differenz zwischen Modellvariablen und den Datenwerten, multipliziert ihn mit dem Gewicht, nimmt dies zum Quadrat und addiert es zu der Fehlersumme. Diese Fehlersumme wird minimiert.

Zur Kalibrierung der zu optimierenden Konstanten des Modells werden zunächst die Wertebereiche, Minimum (MIN) und Maximum (MAX) der jeweiligen Variablen, für die Suche im Parameterraum festgelegt. Resultat der Kalibrierung sind die optimierten Werte (OW) der jeweiligen Parameter, die zur optimalen Einstellung des finalen Basismodells genutzt werden. [30]

Statistische Maße zur Auswertung der Kalibrierung Zur Auswertung der Kalibrierung werden ausgewählte statistische Maße herangezogen, um die Kalibrierungsgüte zu bewerten. Dabei handelt es sich um die Gütemaße

- Bestimmtheitsmaß bzw. Determinationskoeffizient R^2 ,
- Mittlerer quadratischer Fehler bzw. Root-Mean-Square Error (RMSE),
- Mittlerer absoluter Fehler bzw. Mean Absolute Error (MAE),
- Mittlerer absoluter, prozentualer Fehler bzw. Mean Absolute Percentage Error (MAPE) sowie
- Mittlerer absoluter Fehler des Mittelwerts bzw. Mean Absolute Error over Mean (MAEoM).

Nach Pflieger [118] bestimmt das Bestimmtheitsmaß bzw. der Determinationskoeffizient R^2 die Stärke der Korrelation und erklärt damit die lineare Regression. Diese Maßzahl liegt in der typischen Regression zwischen 0 und 1, wobei bei

- 0: kein linearer Zusammenhang und
- 1: perfekter linearer Zusammenhang besteht.

R^2 stellt den Anteil der Varianz der abhängigen Variablen y , der durch die unabhängige Variable x erklärt werden bzw. deren Werte vorhersagen kann, dar. Die abhängige Variable y ist in diesem Fall die gemessene Größe. Die Varianz zeigt in diesem Kontext die Schwankungen zwischen den abhängigen und unabhängigen Variablen auf.

Die einzelnen Beobachtungen y_i lassen sich aus der Summe des vorhergesagten Wertes \hat{y}_i und der Abweichung zwischen beobachtetem und vom Modell vorhergesagtem Wert e_i bestimmen. e_i stellt in diesem Kontext den Fehler bzw. das Residuum dar.

$$y_i = \hat{y}_i + (\hat{y}_i - \bar{y}) = \hat{y}_i + e_i \quad (3.8)$$

wobei

y_i = Beobachteter, gemessener Wert

n = Anzahl der Beobachtungen ($i=1, \dots, n$)

\hat{y}_i = Vorhergesagter Wert

\bar{y} = Mittlerer beobachteter Wert

e_i = Abweichung zwischen beobachtetem und vom Modell vorhergesagtem Wert

Auf der Basis lässt sich nun R^2 ableiten.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.9)$$

Aufgrund von Einflussfaktoren kann in einem nichtlinearen Modell die erklärte Variation $\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ größer als die Gesamtvariation $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ sein. Daher kann R^2 in diesem Fall auch negativ ausfallen.

Wird dieses Konzept nun auf die vorliegende Auswertung der Simulationsergebnisse des SD-Modells S und der tatsächlichen, realen Werte R aus den Sekundärdatenquellen zum Zeitpunkt t übertragen, wird R^2 folgendermaßen definiert.

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (S_t - \bar{R})^2}{\sum_{t=1}^n (R_t - \bar{R})^2} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n E_t^2}{\sum_{t=1}^n (R_t - \bar{R})^2} \quad (3.10)$$

wobei

\bar{R} = Mittlerer tatsächlicher, realer Wert

Der mittlere quadratische Fehler bzw. Root-Mean-Square Error $RMSE$ ist die Wurzel aus dem Mittelwert des quadratischen Prognosefehlers. Diese Maßzahl ist skalenabhängig; dies bedeutet, dass die ausgewählten Variablen zum Vergleich und zur Berechnung dieselbe Einheit vorweisen müssen, um Vergleiche der Zeitreihen der realen und simulierten Werte durchführen zu können. [70, 152]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (S_t - R_t)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n E_t^2}{n}} \quad (3.11)$$

Mittels des mittleren absoluten Fehlers bzw. Mean Absolute Error MAE wird die Genauigkeit von Vorhersagen bestimmt. Dieses Gütemaß wird folgendermaßen formalisiert.

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |E_t|}{n} \quad (3.12)$$

MAE beschreibt die Höhe der Abweichung der Vorhersage von der Beobachtung, nicht jedoch die Abweichungsrichtung (positive oder negative Abweichung). Diese Maßzahl ist wie bereits RMSE skalenabhängig. [70, 152] Der mittlere absolute, prozentuale Fehler bzw. Mean Absolute Percentage Error $MAPE$ wird definiert als $P_t = \frac{100 \cdot E_t}{R_t}$. Prozentuale Fehler haben den Vorteil, dass sie skalenunabhängig sind. [70, 152]

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{100 \cdot E_t}{R_t} \right|}{n} = \frac{\sum_{t=1}^n |P_t|}{n} \quad (3.13)$$

wobei

P_t = Prozentualer Fehler

Der mittlere absolute Fehler des Mittelwerts bzw. Mean Absolute Error over Mean MAE_{oM} ist der Quotient aus MAE und \bar{R} . [70, 152]

$$MAE_{oM} = \frac{\frac{\sum_{t=1}^n |P_t|}{n}}{\frac{\sum_{t=1}^n R_t}{n}} = \frac{MAPE}{\frac{\sum_{t=1}^n R_t}{n}} \quad (3.14)$$

3.1.4. SD-Modelle mit Bezug zum Verkehr

In diesem Abschnitt werden ausgewählte SD-Modelle aus dem Stand der Forschung in den Bereichen Verkehrsplanung, Raumentwicklung, Stadtplanung, Ökonomie und Sozialforschung aufgezeigt. Interdependenzen zwischen der Bevölkerung, der Ökonomie, der Verkehrsnachfrage, des Verkehrsangebots und der Umwelt werden mittels SD genauer analysiert und auf verschiedenen räumlichen Ebenen abgebildet. Die folgenden SD-Ansätze wurden im Detail untersucht und überprüft, ob sie für den eigenen Forschungsfokus relevante Informationen enthalten.

Der Begründer der SD-Modellierung Jay W. Forrester [50] untersucht zunächst die Wechselwirkungen zwischen Wirtschafts-, Unternehmens- und Organisationssystemen. Danach erkennt er, dass diese Methodik nicht nur auf wirtschaftliche, sondern auch auf sämtliche soziale Systeme übertragbar ist. Damit widmet sich Jay W. Forrester als nächstes in seinem Modell *Urban Dynamics* der Wirkungsabschätzung von Maßnahmen zur Bekämpfung der urbanen Armut [51]. Im Auftrag des Club of Rome entwickelt er das *World Dynamics* Modell, das sich auf die globalen Interdependenzen zwischen Bevölkerung, Konsum, Rohstoffverbrauch und Umwelt konzentriert (Forrester [52], Meadows et al. [101, 102]).

Nach anfänglicher, scharfer Kritik der Methodik, erlangt SD innerhalb der letzten Jahrzehnte neue Relevanz und wird zur Abbildung von ökonomischen und verkehrlichen Prozessen in der Raum- und Verkehrsforschung zunehmend genutzt (Bossel [18, 19, 20], Sterman [153]).

Heimgartner [66] und Lee [93] entwickeln SD-Modelle, die den Verkehr und die Flächennutzung zur Erhöhung der Verkehrsqualität integriert betrachten. Heimgartner [66] evaluiert in diesem Kontext nachhaltigkeitsfördernde Maßnahmen. Mittels eines Koppelungsansatzes von einem SD-Modell und einem ökonomischen Ansatz analysieren Raux [121] und Raux et al. [122] mittel- und langfristige Effekte urbaner, verkehrspolitischer Instrumente auf den Personenverkehr. Emberger [38] entwickelt zunächst das Kausalketten-Modell CARINT (CAusal loop Research on INtegrated Transport) zur Analyse des sozioökonomischen Systems Verkehr. Basierend auf diesem systemtheoretischen Modell von Emberger [38] erweitert Pfaffenbichler [117] diesen Ansatz zu einem quantitativen SD-Ansatz. Mittels dieses aggregierten, integrierten, dynamischen Flächennutzungs- und Verkehrsmodells MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulation) werden verkehrspolitische Eingriffe zur Regulierung des öffentlichen und privaten Verkehrs in Städten untersucht. Dabei analysiert er die Wechselwirkungen zwischen Verkehr und Flächennutzung auf urbaner Ebene. Jifeng et al. [73] widmen sich den Interdependenzen zwischen Bevölkerung, ökonomischer Entwicklung, Fahrzeugflottenentwicklung, Umwelteinflüssen, Verkehrsnachfrage, Verkehrsangebot und Verkehrsstauniveau. Explizit gehen sie auf die Ursache-Wirkungsbeziehungen und deren Rückkopplungsstrukturen ein. Zhan et al. [175] beleuchten die Wechselbeziehungen zwischen Bevölkerung, Ökonomie, Personenverkehr, Verkehrsinfrastruktur und Umwelt auf urbaner Ebene. Ruutu et al. [129] modellieren ein SD-Modell, das die Verkehrsmittelwahl privater Verkehrsteilnehmer auf urbaner Ebene abbildet. Bei ihrem Verkehrsmittelwahlmodell differenzieren sie nach MIV und ÖPNV. Dieser Ansatz zeigt die Auswirkungen verschiedener verkehrspolitischer Instrumente zur Reduzierung von Abgasemissionen auf. Diese präsentierten Ansätze konzentrieren sich auf urbane Systeme und auf die Interaktionen zwischen Verkehr, Ökonomie und Flächennutzung unter Berücksichtigung nachhaltiger Aspekte. Zudem untersuchen sie verkehrspolitische Maßnahmen und deren Auswirkungen.

Am Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung der Universität Karlsruhe (IWW) sind die SD-Modelle ESCOT (Economic assessment of Sustainability poliCies of Transport; [131]) und ASTRA (Assessment of Transport Strategies; [72, 132]) entwickelt worden. Diese ermöglichen eine großräumige Wirkungsabschätzung politischer Maßnahmen für den Verkehrsbereich hinsichtlich der nachhaltigen Entwicklung. Diese Ansätze wurden jeweils in vier Subsysteme (Makroökonomie, Regionalwirtschaft, Verkehr und Umwelt) unterteilt. Mittels des System Dynamics Transport Master Modells koppelt Kuchenbecker [91] ASTRA und ESCOT mit einem makroskopischen, aggregierten Verkehrsnachfragemodell. Damit will er das hohe Detaillierungsniveau der traditionellen Verkehrsmodellierung sowie die Rückkopplungsfunktionen und langfristigen Zeitverlaufsanalysen von SD nutzen. Dabei berücksichtigt er den Güterverkehr als Anteil im Subsystem Verkehr. Kraft et al. [86] unternehmen den Versuch, ASTRA mit dem netzwerk-basierten Personenverkehrsmodell VACLAV zu koppeln. VACLAV ist ein klassischer 4-Stufen-Ansatz mit den jeweiligen Modellierungsschritten Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung, Verkehrsmittelaufteilung und Verkehrsumlegung. Der Untersuchungsraum ist Europa. ASTRA wurde stetig erweitert und angepasst [87]. Yao et al. [174] evaluieren die

nachhaltige Leistungsfähigkeit großer Infrastrukturprojekte während der Konstruktions- und Betriebsphasen mittels SD. Han und Hayashi [65] befassen sich mit dem überregionalen Personenverkehr in China und entwickeln ein SD-Modell zur Wirkungsabschätzung politischer Maßnahmen. Ziel dabei ist die Minderung der Abgasemissionen. Diese Ansätze wurden für die nationale und regionale Ebene konzipiert.

Struben und Sterman [155], Shepherd et al. [146] sowie Kühn und Krail [88, 92] beschäftigen sich mit der Flottenentwicklung und der Verbreitung alternativer Antriebe. Dabei betrachten sie ausgewählte Verkehrsmärkte auf nationaler Ebene. Shepherd et al. [146] analysieren aufbauend auf der Arbeit von Struben und Sterman [155] den britischen Verkehrsmarkt hinsichtlich der Verbreitung elektrisch betriebener Fahrzeuge innerhalb der nächsten 40 Jahre. Hierbei berücksichtigen sie die Wirkungen der Faktoren, u. a. Subventionen, Reichweite, Erreichbarkeit, Verfügbarkeit der Ladestationen, Emissionsraten und Steuereinnahmen, auf die Akzeptanz, den Adaptionsprozess und die CO₂-Emissionen. Kühn und Krail [92] konzentrieren sich hingegen auf die steigende Nachfrage nach leichten Nutzfahrzeugen aufgrund der Verhaltensänderungen hin zum E-Commerce und des resultierenden Bedarfs nach hoher Belieferungsflexibilität und -frequenz. Basierend auf einer gegebenen Verkehrsnachfrage wird eine dynamische Verbindung zwischen erbrachter Laufleistung und Fahrzeugflottenentwicklung gezeigt. Krail und Kühn [88] untersuchen die Einführung alternativer Antriebsformen in den deutschen Güterverkehrsmarkt. In diesem Kontext betrachten sie die Potentiale dieser Technologien für drei verschiedene Typen des Straßengüterverkehrs (u. a. Leicht-, Schwer- und Fernverkehr).

Einige Studien fokussieren sich auf den Güterverkehr und dessen Auswirkungen auf nationaler Ebene oder auf die gesamte Wertschöpfungskette, um damit effiziente, logistische Strategien zu identifizieren (u. a. [6, 59, 130]). Salini und Karsk [130] entwickeln das SD-Modell SimTrans zur Untersuchung des Güterverkehrsmarktes in Frankreich. Hierbei berücksichtigen sie den Schienen- und Straßenverkehr sowie die Binnenschifffahrt und bilden die Wechselwirkungen zwischen den Verkehrsmitteln, der Produktivität und der Unternehmenskapazität ab. Gacogne [59] präsentiert ein SD-Modell, das die Wirkungszusammenhänge zwischen logistischen Organisationen und dem Güterverkehr analysiert. Aschauer et al. [6] modellieren die Interdependenzen zwischen logistischen Strategien und Güterverkehrsbewegungen für die gesamte Wertschöpfungskette. Damit zeigen sie auf, dass der Güterverkehr durch verschiedene Parameter im Rahmen einer logistischen Strategie bestimmt wird. Diese Arbeiten untersuchen den Güterverkehr und die Interaktionen zwischen den relevanten Akteuren entweder entlang der gesamten Wertschöpfungskette oder auf nationaler oder regionaler Ebene.

Mittels SD wird auch die Güterfeinverteilung auf der Letzten Meile im regionalen und urbanen Kontext untersucht. Einerseits werden damit Interdependenzen der Akteure im Güterverkehrssystem erklärt, andererseits langfristige Effekte restriktiver Maßnahmen und deren Auswirkungen auf den Güterverkehr, das Stauniveau und die Transportkosten abgeschätzt (u. a. [107, 170]). Der Forschungsfokus von Weidmann et al. [170] liegt auf der nachhaltigen Güterfeinverteilung auf der Letzten Meile. In einer Fallstudie für die Schweiz analysieren sie das Güterverkehrssystem und seiner beteiligten Akteure Ver-

lader, Logistikdienstleister und Politik. Hierbei berücksichtigen sie die unterschiedlichen Interessen der Akteure sowie deren Interdependenzen zueinander. Meyer Sanches et al. [107] untersuchen langfristige Effekte restriktiver, verkehrspolitischer Maßnahmen zur Regulierung des Güterverkehrs in der Metropolregion Sao Paulo, Brasilien. Ihre Analyse beinhaltet die Wirkungsabschätzung dieser Maßnahmen auf das Verkehrsstauniveau sowie die Transportkosten. Diese SD-Ansätze beleuchten den Güterverkehr und die Wechselbeziehungen zwischen den beteiligten Akteuren auf regionaler oder urbaner Ebene.

Interdependenzen zwischen den ökonomischen Akteuren untereinander werden von Villa et al. [168] und Bockermann et al. [15] mittels SD dargestellt. Villa et al. [168] gehen auf die bestellerseitigen Entscheidungen des Einzelhändlers in Abhängigkeit von Kapazitätsengpässen und Belieferungsverzögerungen des Verladers ein. Sie berücksichtigen die Wechselbeziehungen zwischen dem Verlager, dem Einzelhändler und den Endverbrauchern sowie das Supply Chain Management dahinter. Bockermann et al. [15] bilden nachhaltige Strategien für die europäischen Ökonomie mittels SD ab. Ihr SD-Modell beinhaltet die Messung des Energie- und Materialverbrauchs. Zudem zeigt es die Verknüpfung zwischen ökonomischer Entwicklung und Umwelteinwirkungen auf. Weiterführend berechnen sie Beschäftigungseffekte politischer Maßnahmen. Somit erlaubt dieser Ansatz die Einbeziehung relevanter sozialer Belange bei der Evaluierung nachhaltiger Politikmaßnahmen. Beide Ansätze konzentrieren sich auf den ökonomischen Sektor. Jedoch untersuchen Villa et al. [168] die mikroökonomische Ebene für ein Unternehmen und Bockermann et al. [15] dagegen die makroökonomischen Ebene für ganz Europa.

Bevölkerungs- und Haushaltsdynamiken sowie deren Soziodemographie und -ökonomie werden in der Sozialforschung unter Verwendung von SD prognostiziert [18, 19, 20, 39, 74]. In diesem Kontext widmet sich Engel [39] der Abbildung der Bevölkerung, differenziert nach Alters- und Haushaltsgrößenklassen. Die Wechselbeziehung zwischen Haushaltsgröße und Verkehrsaufkommen wird im Detail erklärt. Jin et al. [74] setzen ihren Fokus auf die Beziehung zwischen der Bevölkerung und dem Konsumverhalten.

In Tabelle 3.1 werden die zuvor beschriebenen SD-Ansätze nach ihrer jeweiligen räumlichen Auflösung und ihren Untersuchungsobjekten charakterisiert.

Tabelle 3.1.: Charakterisierung ausgewählter System Dynamics Ansätze.

Modellierungsansatz	Untersuchungsobjekte													
	RA	BEV	PKV	PMV	ÖK	GN	GVN	FB	LL	TZ	TK	VA	EE	POL
Lee [93]	U	x	—	x	—	—	—	—	—	—	—	x	x	x
Heimgartner [66]	U	x	—	x	—	—	—	—	—	—	—	x	x	x
Raux et al. [122]	U	x	—	x	—	—	—	—	—	—	—	x	x	x
Pfaffenbichler [117]	U	x	—	x	—	—	—	—	—	—	—	x	x	x
Jifeng et al. [73]	U	x	—	x	x	—	x	—	—	—	—	x	x	x
Zhan et al. [175]	U	x	—	x	—	—	—	—	—	—	—	x	x	x
Ruutu et al. [129]	U	x	—	x	—	—	—	—	—	—	—	x	x	x
ESCOT [131]	E/N	x	—	x	x	x	x	x	x	—	x	—	x	x
ASTRA [132]	E/N	x	—	x	x	x	x	x	x	—	x	x	x	x
Kuchenbecker [91]	R/N	x	—	x	x	x	x	x	x	—	x	x	x	x
Yao et al. [174]	N	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	x	—	x
Han und Hayashi [65]	N	—	—	x	—	—	—	—	—	—	—	x	x	x
Struben und Sterman [155]	N	—	—	—	—	x	x	x	x	—	—	—	—	—
Shepherd et al. [146]	N	—	—	—	—	—	x	x	x	—	—	—	—	—
Kühn und Krail [92]	N	—	—	—	—	—	x	x	x	—	—	—	—	—
Krail und Kühn [88]	N	—	—	—	—	—	x	x	x	—	—	—	—	—
Gacogne [59]	N	x	—	x	—	—	—	—	—	—	x	—	x	x
Salini und Karsk [130]	N	x	—	x	—	—	—	—	—	—	—	x	x	x
Aschauer et al. [6]	N	—	—	—	x	x	—	x	x	x	x	x	x	x
Weidmann et al. [170]	R	x	—	x	—	—	—	—	—	—	—	x	x	x
Meyer Sanches et al. [107]	B	x	—	x	—	—	—	—	—	—	—	x	x	x
Villa et al. [168]	B	—	x	—	x	—	—	—	—	x	—	x	—	—
Bockermann et al. [15]	E	x	—	x	—	—	—	—	—	—	—	x	x	x
Bossel [18]	N	x	—	x	—	—	—	—	—	—	—	x	x	x
Bossel [20]	N	x	—	x	—	—	—	—	—	—	—	x	x	x
Engel [39]	N	x	—	x	—	—	—	—	—	—	—	x	x	x
Jin et al. [74]	U	x	x	—	x	—	—	—	—	—	—	—	—	x

RA=Räumliche Auflösung; B=Betriebsebene, U=Urbane Ebene, R=Regionale Ebene, N=Nationale Ebene,
E=Europäische Ebene; BEV=Bevölkerung; PKV=Privates Konsumverhalten; PMV=Privates Mobilitätsverhalten;
ÖK=Ökonomie; GN=Güternachfrage; GVN=Güterverkehrauffrage; FB=Flottenbestand; LL=Laufleistung;
TZ=Transportzeit; TK=Transportkosten; VA=Verkehrsaufkommen; EE=Externe Effekte; POL=Politische Maßnahmen;

3.2. Agentenbasierte Verkehrssimulation

Zur Kopplung des SD-Modells mit einer MVS wird das von Balmer et al. [8] entwickelte MATSim (Multi Agent Transport Simulation Tool) genutzt. Dieses Modell bietet die Möglichkeit, neben dem MIV auch den Güterverkehr [140] abzubilden. Aufgrund dessen wird MATSim als Referenzmodell zur Durchführung zeitpunktgenauer Prognosen auf disaggregierter, räumlicher Ebene herangezogen.

MATSim ist ein mikroskopisches, disaggregiertes Verkehrsnachfragemodell, welches das Verhalten bzw. Aktivitäten der Agenten im physikalischen Infrastruktursystem abbildet. Dementsprechend zeigt es die Systemdynamiken im Detail auf. Grundsätzlich wird in MATSim ein Tag modelliert. Für die Netzwerksimulation wird ein Warteschlangenmodell implementiert.

Ein Gleichgewicht wird in MATSim mittels des koevolutionären Algorithmus (u. a. Popovici et al. [119]) gesucht. Diese Algorithmen entwickeln bestimmte Arten von Interaktionen (z. B. Wettbewerb). In MATSim sind heterogene Individuen, sogenannte Agenten, durch ihre Pläne repräsentiert. Ein Agent stellt hierbei einen statistischen Repräsentanten eines Akteurs des modellierten Untersuchungsraumes dar [105, S. 2]. Diese Akteure sind dabei Verkehrsteilnehmer im Verkehrssystem. Jeder Agent optimiert mehrmals seinen täglichen Aktivitätsplan im Wettbewerb für Raum-Zeitfenster mit allen anderen Agenten auf der Verkehrsinfrastruktur. Hierbei können Entscheidungsdimensionen, wie z. B. Zeitwahl [7], Verkehrsmittelwahl [62] oder Zielwahl [68] in der iterativen Schleife berücksichtigt werden. Mit dem Algorithmus wird die Optimierung eines Agentenplans durchgeführt (für den ganzen Tagesplan der Aktivitäten und Reisen). Dabei wird mehr als ein Verkehrsflussgleichgewicht erzielt, das Aktivitäten ignoriert. Hierbei besteht ein Unterschied zwischen der Anwendung eines evolutionären und eines koevolutionären Algorithmus. Ein evolutionärer Algorithmus würde zu einem Systemoptimum führen, da die Optimierung mit einer globalen (oder Population) Tauglichkeitsfunktion angewendet wird. Stattdessen führt der koevolutionäre Algorithmus zu einem (stochastischen) Nutzergleichgewicht, da die Optimierung hinsichtlich individueller Scoring-Funktionen und im Rahmen einer Agentenmenge von Plänen durchgeführt wird. [69, S. 7]

Dementsprechend bietet MATSim als mikroskopisches, agenten- bzw. aktivitätsbasiertes Verkehrsnachfragemodell nicht nur eine Simulationsumgebung für Fahrzeugbewegungen im Raum, sondern ebenso klare Schnittstellen für den Informationstransfer zwischen physischer Ebene und individueller Entscheidungsebene. MATSim ist fahrtenbezogen bzw. aktivitätenbasiert und bildet die Aktivitäten einzelner Agenten im Netz ab. Staueffekte und die daraus resultierenden verspäteten Ankunftszeiten werden in die einzelnen Nachfragemodelle zurückgekoppelt, wo die Agenten ihre Aktivitätspläne evaluieren können. Die einzeln getätigten Aktivitätspläne der Agenten werden über Kosten-Nutzen-Analysen bewertet. Dabei können sie Fahrtzeiten, -distanzen und verspätete Ankunftszeiten auswerten. Auch können Auswirkungen räumlich und zeitlich differenzierter verkehrspolitischer Maßnahmen auf das Verhalten der Agenten abgeschätzt werden [57, 58, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 176]. Verhaltenslenkende Maßnahmen können in diesem Kontext beispielsweise City-Maut Konzepte und Durchfahrtsregulierungen sein.

Diese Maßnahmen werden exogen integriert. Dabei wird eine Wirkungsabschätzung der Routenwahlveränderung bedingt durch die implementierten Maßnahmen quantifiziert und evaluiert. Eigene Module können für MATSim programmiert werden, um MATSim als Plattform zur Verkehrssimulation zu nutzen. Neben der offenen Schnittstelle zur Erweiterung ist der Quellcode frei verfügbar.

Balmer et al. [8] haben MATSim zur Abbildung des Personenverkehrs entwickelt. Zur Modellierung des Güterverkehrs wurden bereits mehrere Ansätze in MATSim integriert. Shah [145] untersucht die leichten und schweren Nutzfahrzeuge in Zürich. Zu diesem Zweck disaggregiert er verfügbare Quell-Ziel-Matrizen zu Güterverkehrsflüssen. Hierzu modelliert er nur die Routenwahl der Güterverkehrsagenten. Joubert et al. [76] bilden in ihrem tourbasierten Ansatz den Güterverkehr der Region Gauteng (Südafrika) ab. Dabei bestimmen sie eine Tour als Resultat wirtschaftlicher Aktivitäten und leiten mittels der spezifischen Tourencharakteristika (u. a. Startzeitpunkt, Stoppdauer etc.) bedingte Wahrscheinlichkeiten ab. Diese Wahrscheinlichkeiten ermitteln sie basierend auf empirisch erhobener Fahrzeugbewegungen. Die Simulationsplattform MATSim wird hinzugezogen, um die Touren im Gesamtverkehrssystem, neben Personenverkehrsaktivitäten, auszuführen und auszuwerten. Nagel et al. [110] evaluieren die Wirkung einer fahrzeug-typspezifischen Mautstruktur, in der die Teilpopulationen, u. a. auch der Güterverkehr, unterschiedliche Zeitwerte haben. Ein rationales Entscheidungsmodell wurde von Schröder et al. [135, 136, 137, 138, 139, 140, 176] entwickelt, die in MATSim das Logistik-Modul *Jspit* integrieren. Sie entwickeln ein Logistik-Verhaltensmodell zur Analyse der städtischen Distribution von Logistikdienstleistern sowie zur Abschätzung räumlich und zeitlich differenzierter Auswirkungen verkehrspolitischer Maßnahmen auf die Distribution [57, 58, 136]. In diesem Rahmen werden logistische Akteure (u. a. Frachtfahrzeugfahrer, Frachtverkehrsunternehmen) integriert. Die logistischen Entscheidungen der Frachtfahrzeugfahrer werden abgebildet, die von den Frachtverkehrsunternehmen getroffen werden. Fokus liegt hier auf der Analyse kurz- und mittelfristiger Reaktionen eines verhaltenshomogenen Sektors. Dieser Ansatz bildet taktische und operative Entscheidungen der Akteure ab. Als Fallbeispiele wurden bereits Verhaltensmodelle zur Analyse der Lebensmitteldistribution und des KEP-Verkehrs in urbanen Räumen erarbeitet. Hierbei werden nur Distributions- und Sammelfahrten der Logistikdienstleister auf der Letzten Meile abgebildet. Der Vor- und Hauptlauf wird von der Analyse ausgeschlossen. [135]

Das Modell nach Schröder et al. [57, 58, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 176] basiert dabei auf folgenden Annahmen.

- Frachtführer ist Kostenminimierer.
- Transportdienstleistungen und ihre entsprechenden Kunden — alle Transportaufträge — sind im Vorfeld bekannt.
- Jeder Frachtführer hat eine bestimmte Anzahl an Depots, die im Vorfeld bekannt sind.
- Transportdienstleistungen werden durch Zeitfenster beschränkt und induzieren Lieferzeiten.

- Jeder Frachtführer verfügt über eine Fahrzeugflotte, die aus spezifischen Fahrzeugtypen besteht. Diese Typen sind im Vorfeld bekannt.
- Jeder Fahrzeugtyp hat unterschiedliche Charakteristika (u. a. Kapazitäten und Kosten).
- Jedes Fahrzeug kann nur einer Fahrzeugroute zugeordnet werden.
- Die Fahrzeuge starten und enden am selben Depot.
- Transportzeiten und -kosten zwischen Kunden und Depots sind von der Abfahrtszeit, vom Fahrzeugtyp und vom physischen Verkehrsnetz abhängig (z. B. Stauniveau, implementierte Politikmaßnahmen).

Die genannten Vorteile von MATSim zeigen, dass dieser Ansatz als mikroskopisches Referenzmodell für die spätere Verknüpfung mit dem SD-Modell geeignet ist.

Da das Modellierungs- und Simulationsinstrument MATSim keine geschlossene Modellierungstheorie, wie es beispielsweise bei SD der Fall ist, sondern ein umfangreiches Spektrum an Modellierungsmethoden verwendet, werden im Folgenden die einzelnen Modellierungsschritte im Detail erläutert.

Zunächst wird das grundlegende Modellierungsvorgehen im folgenden Abschnitt definiert.

3.2.1. Methodisches Vorgehen im Überblick

Ein MATSim-Lauf beinhaltet eine bestimmte Anzahl an Iterationen. Dieser startet mit einer initialen Nachfrage (Initial Demand), die sich durch die vom Untersuchungsraum zugrundegelegten täglichen Aktivitätenketten der Bevölkerung ergibt. Aktivitätenketten werden aus empirischen Daten durch Stichproben oder diskreten Entscheidungsmodellen abgeleitet. Während der Iterationsläufe wird die initiale Nachfrage individuell durch jeden Agenten optimiert. Jeder Agent verfügt hierbei über ein Gedächtnis, das eine fixe Anzahl an Tagesplänen enthält. Jeder Plan beinhaltet die tägliche Aktivitätenkette und eine zugeordnete Wertung, den sogenannten Score. Dieser Score kann als ökonomischer Nutzen interpretiert werden. In jeder Iteration, vor der Simulation der Netzwerkbelastung mit MATSim mobsim (Mobility Simulation) (z. B. [24]), wählt jeder Agent aus seinem Gedächtnis einen Plan aus. Diese Auswahl ist von dem Plan-Score abhängig, der nach jedem Mobsim-Lauf basierend auf der ausgeführten Planleistung berechnet wird. Einer bestimmten Anzahl an Agenten (oft 10 Prozent) wird das Klonen eines ausgewählten Plans und die Modifizierung dieses Klons (Replanning) erlaubt. Die Planmodifizierung wird im Replanning-Modul durchgeführt.

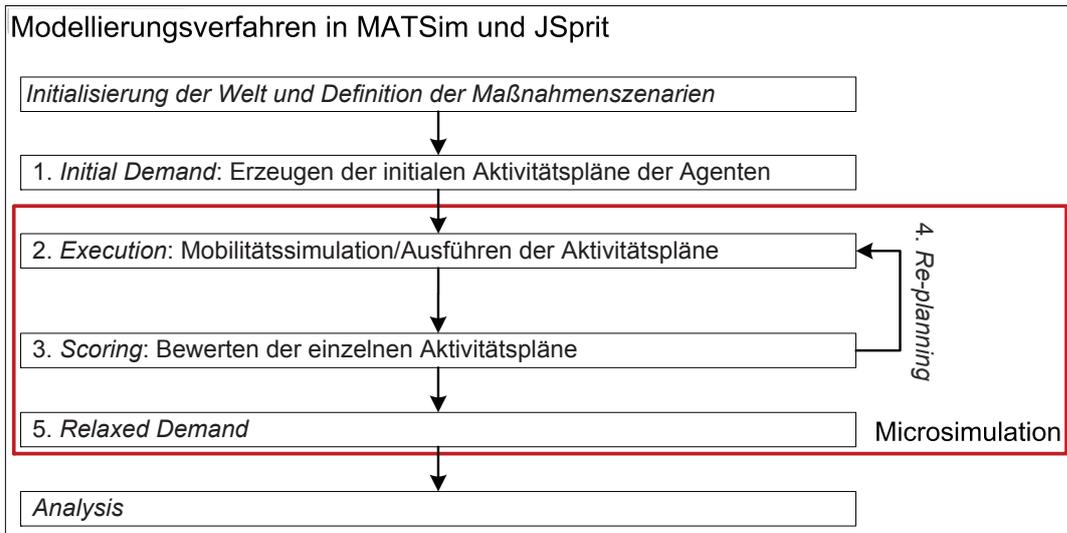


Abbildung 3.3.: Verfahren zur Modellierung und Simulation von MATSim (Eigene Darstellung nach [8]).

Die vier folgenden Dimensionen werden für MATSim üblicherweise berücksichtigt.

- Abfahrtszeit (Aktivitätsdauer) [7]
- Route [95]
- Verkehrsmittel [62]
- Ziel [67, 68]

Das Replanning bietet verschiedene Strategien zur Anpassung der Pläne. Ein Agent kann dabei eine maximale Anzahl an Plänen in seinem Gedächtnis speichern. Wird diese maximale Anzahl überschritten, wird der Plan mit dem niedrigsten Score vom Agentengedächtnis gelöscht. Eine Iteration wird durch die Evaluierung der Agentenerfahrungen mit den ausgewählten Tagesplänen (Scoring) finalisiert. Der iterative Prozess wird solange wiederholt, bis sich der durchschnittliche Score stabilisiert. Die typische Score-Entwicklungskurve [67] hat die Form eines evolutionären Optimierungsfortschritts [37]. Jede Aktion, die in Mobsim durchgeführt wird, generiert ein Event, das zur Analyse aufgezeichnet wird. Die aufgezeichneten Events können zur Evaluierung auf eine gewünschte Auflösung aggregiert werden.

Abbildung 3.3 zeigt das Modellierungs- und Simulationsverfahren im Rahmen von MATSim. ([160, 161] nach [8])

Im Folgenden werden die Modellierungs- und Simulationsschritte von MATSim im Detail erläutert.

3.2.2. Initialisierung der Welt und der Nachfrage

Die erste Voraussetzung für eine Simulation ist der Aufbau der synthetischen Welt, der sogenannten Initialen Welt, von MATSim. Dazu wird das *Verkehrsinfrastrukturangebot* sowie die *Verkehrsnachfrage* benötigt. Um eine initiale Verkehrsnachfrage zu generieren, muss zunächst eine künstliche Population für den Untersuchungsraum sowie die Aktivitätspläne der einzelnen Agenten erzeugt werden.

Verkehrsinfrastruktur Das physische Verkehrsinfrastrukturnetzwerk, das die Verkehrswege darstellt, wird abgebildet. Das zugrundeliegende Straßennetz wird mittels eines gerichteten Graphen $G = (V, E)$ beschrieben. Dieser Graph G besteht aus einer Menge an Knoten V (geographisch verortete Punkte) und an Kanten E . Die Positionen der Knoten V werden durch eine x- und y-Koordinate definiert. Zudem wird diesen Knoten eine eindeutige Identifikationsnummer (ID) zugewiesen. Die Kanten E haben jeweils einen Start- und Endknoten. Verwendet wird das Gauß-Krüger-Koordinatensystem (GK4). Den Kanten werden folgende Attribute zugeordnet. [57, 58]

- Länge [m]
- Geschwindigkeit bei freier Fahrt [m/s]
- Kapazität [Fahrzeuge/Kante]
- Anzahl Spuren

Private Verkehrsnachfrage Zur Beschreibung der Verkehrsnachfrage werden Standorte der betrachteten Akteure im System integriert. Neben den Quellen sind auch die Ziele bzw. Senken der Individuen zu bestimmen (u. a. Einkaufs-, Freizeitmöglichkeiten, Arbeitsstätten, Ausbildungseinrichtungen, etc.). Die Wohnstandorte der Population und die Aktivitätsstandorte müssen als Koordinaten im Netzwerk hinterlegt sein. Zur Abbildung der Bevölkerungsstruktur werden vornehmlich Zensusdaten verwendet. Zur Integration der Standorte auf dem Netzwerk ist es notwendig, den Adressen die jeweiligen Geokoordinaten zuzuordnen. Hierbei erfolgt eine Umwandlung in das internationale geodätische Referenzsystem WGS84. Im Anschluss erfolgt die Transformation in das dem Straßennetz zugrundegelegte Geokoordinatensystem GK4. Dadurch gelingt eine eindeutige Zuweisung eines Standortes zu einer Kante im Netz.

Danach müssen zur Erzeugung der initialen Nachfrage (*Initial Demand*) für jeden Agenten Aktivitätspläne für einen Tag generiert werden. Die initiale Nachfrage ist in diesem Kontext die Verkehrsnachfrage, die als Menge an Agenten im Verkehrssystem zu verstehen ist.

Dabei bekommt jeder Agent folgende Attribute zugeordnet.

- Soziodemographische und -ökonomische Charakteristika (u. a. Geschlecht, Alter, Einkommen)
- Art der Aktivitäten (u. a. Wohnen, Arbeit, Einkaufen, etc.)

- Standorte der Aktivitäten
- Start- und Endzeiten der jeweiligen Aktivitäten
- Aktivitätsdauer
- Autoverfügbarkeit
- Besitz eines ÖV-Zeitabonnements
- Kürzeste Route im Netz

Zur späteren Berechnung von Emissionen oder spezifischer Maximalgeschwindigkeit ist es notwendig, verschiedene Fahrzeugtypen zu spezifizieren, die verschiedenen Personen, Verkehrsmitteln und Fahrten zugeordnet werden. Dabei wird eine synthetische Fahrzeugflotte generiert. Für jeden Fahrabschnitt wird bestimmt, welches Verkehrsmittel genutzt wird. Die Fahrzeuge werden den jeweiligen Standorten zugeordnet, wo sie von Agenten benötigt werden. Grundlegend werden alle Fahrzeuge den Wohnstandorten der Personen zugeteilt. [105] Diese Attribute der jeweiligen Akteure im System sind entweder im Vorfeld bekannt oder statistische Werte werden mittels ausgewählter Verteilungsverfahren (u. a. Zufallsverteilung, Normalverteilung, Monte-Carlo-Simulation, Entropiemaximierung) an die einzelnen Agenten verteilt.

Güterverkehrsnachfrage Zunächst müssen zur Abbildung der Güterverkehrsnachfrage die Standorte der Frachtführer bzw. Logistikdienstleister (u. a. Depots, Distributionszentren) in den Untersuchungsraum integriert werden. Diese Standorte werden über eine Sekundärdatenrecherche erhoben. Wie bereits beschrieben, erfolgt dabei eine Transformation der WGS84- in UTM-Koordinaten, um eine Zuweisung der Standorte zu einer Kante im Netz zu erlauben.

Die Input-Daten sind in dem Ansatz nach Schröder et al. [58, 140] die auszuliefernde Gütermenge, Anzahl der verwendeten Fahrzeuge, deren ökonomische und ökologische Charakteristika, Betriebszeiten und Belieferungszeitfenster der Kunden.

Jedem Distributionszentrum werden für die Auslieferung der verschiedenen Warengruppen unterschiedliche Fuhrparks zugewiesen, die durch spezifische LKW-Typen und Betriebszeiten charakterisiert sind.

Jedes Depot verfügt über eine Menge an Fahrzeugtypen. Die Charakteristika der Fahrzeuge sind Fahrzeugtyp und fahrzeugspezifische Merkmale des jeweiligen Fahrzeugtyps (u. a. Fahrzeugkapazität, Transportkosten). Eine Aktivitätskette im Güterverkehr ist eine Sequenz von Aktivitäten. Aufgrund dessen startet und endet die Route des Fahrzeugs jeweils am gleichen Depot. Eine Aktivität resultiert aus der Belieferung eines Kunden. Dies bestimmt Typen und Quantitäten von Gütern, die geliefert werden müssen. Zusätzlich beinhaltet es den entsprechenden Standort sowie das Belieferungszeitfenster und die Lieferzeit. Alle Dienstleistungen und ihre Zuordnungen zum Spediteur sind exogene Vorgaben an das Modell (u. a. Sendungsgröße, Sendungsfrequenz). Die Güternachfrage wird demzufolge im Sinne von Quellen und Senken bzw. Aufträgen nicht explizit

modelliert, sondern als gegeben angesehen. Hierbei handelt es sich um die Kunden der Distributionszentren. Diese bilden die Zielorte der Lieferrelationen. Die Standorte der Kunden werden entweder synthetisch generiert oder beruhen auf tatsächlichen Adressen der Unternehmen. Auch hier erfolgt eine Sekundärdatenrecherche zur Erhebung dieser Standorte. Dazu muss wiederum eine Umwandlung der Geokoordinaten vom WGS84-Format in das GK4-Format zur eindeutigen Zuordnung der Standorte zu den Kanten im Netz erfolgen.

Im Modell werden nur 1:n-Relationen zwischen Distributionszentren und Kunden abgebildet. Dies bedeutet, dass ein Kunde nur von einem Distributionszentrum beliefert wird, wohingegen das Distributionszentrum mehrere Kunden beliefert.

Der Logistikdienstleister verfügt über Ressourcen (u. a. Depotstandorte, Fahrzeugbestand). Die Logistikdienstleister werden mit einer fixen Anzahl an Depots ausgestattet. Die Anzahl der Fahrzeuge wird endogen modelliert. Jedoch ist der Satz an Fahrzeugtypen, die der Logistikdienstleister verwenden kann, Teil der initialen Ausstattung. Die Berechnung der optimalen Zusammensetzung des Fuhrparks je Logistikstandort erfolgt während des Modelldurchlaufs. Voraussetzung dafür ist, dass jeder Fahrzeugtyp je Fuhrpark in ausreichender Anzahl vorhanden ist.

Die Charakteristika der Fahrzeugtypen werden als stabil angenommen. Ein Fahrzeugtyp beinhaltet Informationen zu typspezifischen Kosten und physikalischen Charakteristika (u. a. Kapazität und Antriebsform). Die Transportkosten werden in Fixkosten C_f , wegababhängige bzw. variable Kosten C_v und zeitabhängige Kosten C_z untergliedert.

Belieferungszeitfenster werden extern vorgegeben. Diese können sich nach Ladenöffnungszeiten richten und je nach Branche variieren.

Auch die Entladezeiten sind externe Vorgaben. Diese sind abhängig von der Transporteinheit.

Jeder Kunde, also jede Aktivität, ist dementsprechend eine Nachfrage von einer Einheit und einer spezifischen Lieferzeit. Dabei wird jeder Aktivität ein Belieferungszeitfenster zugeordnet, das die früheste und späteste Betriebsstartzeit festlegt. Die Kunden werden zufällig im Netzwerk verteilt.

Im Ergebnis liegt nun die initiale Nachfrage zur Abbildung des Güterverkehrs zugrunde. Dabei sei $V' \subset V$ die Anzahl an Kunden, die von einem Distributionszentrum beliefert wird. P sei die Menge der günstigsten Wege von jedem Kunden $i \in V'$ zum Kunden $j \in V'$. Der Ausdruck $p_{i,j}(t_d(i), h) \subset P$ beschreibt den günstigsten Weg von i nach j als eine Folge von Kanten aus E . Der Weg ist abhängig von der Abfahrtszeit t_d beim Kunden i und vom Fahrzeugtyp h , wobei $d_{i,j}(t_d(i), h)$ die kleinsten Transportkosten und $t_{i,j}(t_d(i), h)$ die Zeit, die dieser Weg benötigt, definiert. Jedem Kunden $i \in V'$ wird eine Liefermenge $q_i \geq 0$, eine Entladezeit s_i für q_i und ein Zeitfenster $[a_i, b_i]$ mit $a_i < b_i$ zugeordnet. Die Entladezeiten s_i können entweder im Zeitfenster $[a_i, b_i]$ oder zu einem Zeitpunkt t vor a_i beginnen. Im zweiten Fall entsteht eine Wartezeit von $a_i - t$.

H definiert eine Menge an Fahrzeugtypen h . Jeder Fahrzeugtyp ist charakterisiert durch eine Kapazität k^h , Fixkosten C_f^h , marginalen Wegkosten C_v^h und Zeitkosten C_z^h . Die frühesten Abfahrtszeiten vom und spätestens Ankunftszeiten zum Depot sowie die maximale Dauer der Route werden für jedes Fahrzeug bestimmt. Außerdem können zu-

sätzliche Betriebskosten sowohl dem Fahrzeugtyp als auch den Kanten $E \in G$ zugewiesen werden. Dies ist vor allem wichtig, um verkehrspolitische Maßnahmen abzubilden. So kann beispielsweise eine Mautgebühr bestimmten Kanten im Graphen zugeordnet werden, die nur für einen bestimmten Fahrzeugtyp gelten. Diese Kosten werden bei der Berechnung der günstigsten Wege berücksichtigt. [137]

3.2.3. Mobilitätssimulation

Die initiale Nachfrage bildet die Basis für die Mobilitätssimulation bzw. die *Execution*, bei der die Aktivitätspläne der Agenten mittels einer Mikrosimulation ausgeführt werden (Schritt 2). In dieser Mobilitätssimulation wird ein ausgewählter Plan pro Agent in der physischen Wirklichkeit, auf dem Infrastrukturnetzwerk, ausgeführt. Dieser Schritt wird auch Netzwerkbelastung genannt.

In diesem Kontext unterscheiden Charypar et al. [26] zwischen den folgenden Verkehrsflussmodellen.

- Physikalische Simulation (detaillierte Fahrzeug-Folgemodelle)
- Zellulärer Automat (Straßen werden in Zellen diskretisiert)
- Warteschlangensimulation, bei der die Verkehrsdynamik mit Warteschlangen modelliert wird

Die Verkehrssimulation in MATSim ist ein Warteschlangenmodell, das Fahrzeugbewegungen von einzelnen Verkehrsteilnehmern auf infrastruktureller Ebene dargestellt. Das FIFO-Prinzip (First In, First Out) als eine Schlangendisziplin findet bei der Mobilitätssimulation Anwendung. Dabei ist jeder Straßenabschnitt als FIFO-Schlange modelliert. Die Größe der Warteschlange entspricht der maximal möglichen Verkehrsdichte des entsprechenden Straßenabschnitts. Das MATSim-Verkehrsflussmodell basiert auf den zwei Kantenattributen Speicher- und Flusskapazität. Speicherkapazität definiert die Anzahl der PKW, die auf eine Netzwerkkante passt. Die Flusskapazität spezifiziert die Abflusskapazität der Kante. Demzufolge wird festgelegt, wie viele Fahrzeuge die Kante pro Zeitschritt verlassen können. Es ist ein individuelles Attribut der Kante. Dabei können sich Stauungen am Ende der ersten gemeinsamen Kante bewegen. Diese Stauungen gehen dann zur nächsten Kante über, wo sie an Knoten verschmelzen. ([25, S. 99]; [69, S. 6]) Ferner ist eine minimale Verweildauer des Agenten in einer Schlange durch die erlaubte Höchstgeschwindigkeit definiert. Die Simulation eines Weges entspricht der sequentiellen Simulation aller Straßenabschnitte auf der Wegroute. [105, S. 13] Bei diesem Modell können schnellere Fahrzeuge die langsameren nicht überholen. Dabei werden die Fahrzeuge nach ihrer Sequenz, in der sie an der Kante ankommen, sortiert. [126, S. 61ff]

Nach diesem Ansatz fährt ein PKW in eine Netzwerkkante, Straßenabschnitt, von einer Kreuzung an das Ende einer Warteschlange. Es bleibt dort,

- bis die Fahrtzeit auf der Kante mit freiem Fluss abgelaufen ist,
- bis es am Kopf der Warteschlange angelangt ist und

- bis die nächste Kante die Einfahrt erlaubt.

Der Ansatz ist zwar sehr effizient, jedoch kann dieser nur in einer geringeren Auflösung umgesetzt werden. Charypar et al. [26] kombinieren daher den Warteschlangenansatz mit einem ereignisbasierten Ansatz in MATSim. Hierbei findet kein zeitschrittbasierter Aktualisierungsprozess von Agenten statt. Stattdessen werden Agenten nur bewegt, falls unmittelbar eine Aktion erforderlich ist. Beispielsweise müssen Kanten nicht verarbeitet werden, während Agenten diese durchlaufen. Die Steuerung der aktualisierten Ereignisse wird von einem globalen Zeitplaner erledigt. [69, S. 6]

3.2.4. Bewertung der Pläne

Mit dem Schritt *Scoring* werden einzelne Pläne mittels ökonomischer Kosten-Nutzen-Funktionen bzw. Utility Functions analysiert und bewertet (Schritt 3). Jeder Agent lernt mittels der erhaltenen Pläne, die in der Mobilitätssimulation ausgeführt werden. Die Pläne werden nach ihrem Nutzen ausgewählt und ggf. modifiziert (z. B. zufällige Nutzenmodelle nach Ben-Akiva und Lerman [11] sowie Train [165]).

Es wird eine iterative Rückkopplung integriert, um das koevolutionäre Anpassungsproblem zu lösen. Zu diesem Zweck kann jeder Agent mehrere Pläne vorhalten, sie ausprobieren und aufgrund des Nutzenwertes miteinander vergleichen. Die Agentendatenbank beginnt mit dem vollständigen initialen Plan des Agenten. Er wird als gewählt markiert. Die Simulation des Verkehrsflusses führt die markierten Pläne aus und gibt Ereignisse aus. Jeder Agent berechnet den Nutzenwert des ausgeführten Plans auf Grundlage dieser Ereignisse. Im Bereich der *künstlichen Intelligenz* können Nutzenfunktionen auch in einem allgemeineren Weg eingesetzt werden. Beispielsweise wird der Score, den jeder individuelle Agent (oder das System als Ganzes) will oder soll, optimiert [128]. Aufgrund dessen wird der Score und der Nutzen im MATSim-Kontext austauschbar.

Motorisierter Individualverkehr Dabei hat jeder MIV-Agent die folgende Zielfunktion. [25, 27, 44] Die Standardfunktion nach Charypar und Nagel [27], der Nutzen eines Plans U_{plan} , wird als eine Summe aller Aktivitätennutzen $U_{act,i}$ und der Summe aller Reisenutzen $U_{trav,mode(i)}$ berechnet.

$$U_{plan} = \sum_i^n U_{act,i} + \sum_i^n U_{trav,mode(i)} \quad (3.15)$$

wobei

n = Anzahl der ausgeführten Aktivitäten

i = Aktivität

Zur Bewertung wird die letzte Aktivität mit der ersten Aktivität zusammengeführt, um eine gleiche Anzahl an Fahrten und Aktivitäten zu produzieren. Der Nutzen U_{act} einer Aktivität i wird nach Charypar und Nagel [27, S. 377ff] folgendermaßen berechnet.

$$U_{act} = \sum_i^n U_{act,i} = \max\{U_{dur,i} + U_{waiting,i} + U_{late,i} + U_{early.dp,i} + U_{short.dur,i}\} \quad (3.16)$$

wobei

- $U_{dur,i}$ = Nutzen der ausgeführten täglichen Aktivitäten
- $U_{waiting,i}$ = Negativer Nutzen des Wartens während der Aktivitäten
- $U_{late,i}$ = Negativer Nutzen der verspäteten Ankunft an den Aktivitäten
- $U_{early.dp,i}$ = Negativer Nutzen der zu frühen Abfahrt an den Aktivitätsstandorten
- $U_{short.dur,i}$ = Negativer Nutzen der kürzesten Aktivitätsdauer an den Aktivitätsstandorten

Die einzelnen Teilkomponenten dieser Funktion werden folgendermaßen formalisiert. Dabei wird U_{dur} mittels der folgenden Formalisierung spezifiziert.

$$U_{dur} = \sum_i^n U_{dur,i} = \sum_i^n \max[0, \beta_{dur} t_i^* \ln(\frac{t_{dur,i}}{t_{0,i}})] \quad (3.17)$$

wobei

- t_i^* = Durchschnittliche Dauer der Aktivität i
- β_{dur} = Grenznutzen der Aktivität i innerhalb der durchschnittlichen Aktivitätsdauer
- $t_{dur,i}$ = Tatsächliche Dauer der Aktivität i
- $t_{0,i}$ = Null-Nutzenfunktion in Abhängigkeit der durchschnittlichen Aktivitätsdauer

Hierbei wird der Nutzen der durchgeführten Aktivität i ausgedrückt, bei dem die Öffnungszeiten des Aktivitätsortes berücksichtigt werden.

t^* ist die Dauer, bei welcher der Grenznutzen β_{dur} ist, der durch die partielle Ableitung bestimmt wird.

$$\frac{\partial U}{\partial t_{dur}}(t_{dur}) = \frac{\beta_{dur} t^*}{t_{dur}} \quad (3.18)$$

Dabei wird $t_{dur} = t^*$ gesetzt, um für den marginalen Grenznutzen β_{dur} zu erreichen. t_i^* ist die typische Dauer einer Aktivität i bzw. t_i^* bringt das Verhältnis der Dauer der verschiedenen Aktivitäten in ein Gleichgewicht.

t_0 ist die Dauer, bei welcher der Nutzen beginnt positiv zu werden. Einerseits bestimmt t_0 die minimale Dauer einer Aktivität. Falls die Dauer unter diesen Wert fällt, wird es vorteilhafter, die Aktivität zu streichen und stattdessen nichts zu tun. Andererseits definiert t_0 die Priorität einer Aktivität. Der Grenznutzen bei $t_{dur} = t_0$ ist dabei

$$\frac{\partial U}{\partial t_{dur}}(t_0) = \frac{\beta_{dur} t^*}{t_0} \quad (3.19)$$

Wenn nun t_0 proportional zu t^* gesetzt wird (z.B. $t_0 = \alpha t^*$), entscheidet der Proportionalitätsfaktor α über den Grenznutzen bei t_0 und deshalb über die Priorität, mit der eine Aktivität aufrechterhalten wird, wenn die Zeit knapp wird.

3. Verwendete Modellierungsinstrumente

$U_{waiting}$ wird folgendermaßen bestimmt.

$$U_{waiting} = \sum_i^n U_{waiting,i} = \sum_i^n \beta_{waiting} t_{waiting,i} \quad (3.20)$$

wobei

$U_{waiting,i}$ = Negativer Nutzen des Wartens während der Aktivität i

$\beta_{waiting}$ = Grenznegativnutzen der verbrachten Wartezeit

$t_{waiting,i}$ = Wartezeit während der Aktivität i

In diesem Fall wird die verbrachte Wartezeit vor einem geschlossenen Geschäft angegeben. Dazu wird empfohlen, $\beta_{waiting}$ auf null zu setzen. Falls die Ankunftszeit bei der Aktivität i kleiner als die Öffnungszeit ist, ist $t_{waiting,i}$ größer als 0.

U_{late} wird mittels der folgenden Formalisierung berechnet.

$$U_{late} = \sum_i^n U_{late,i} = \begin{cases} \beta_{late} (t_{start,i} - t_{latest.ar,i}) & , t_{start,i} > t_{latest.ar,i} \\ 0 & \end{cases} \quad (3.21)$$

wobei

$U_{late,i}$ = Negativer Nutzen für eine Verspätung an der Aktivität i

β_{late} = Grenznegativnutzen der Verspätung

$t_{start,i}$ = Startzeit für die Aktivität i

$t_{latest.ar,i}$ = Spätest mögliche straflose Startzeit für die Aktivität i

Diese Funktion bestimmt die Strafe für die verspätete Ankunft.

$$U_{early.dp} = \sum_i^n U_{early.dp,i} = \begin{cases} \beta_{early.dp} (t_{end,i} - t_{earliest.dp,i}) & , t_{end,i} > t_{earliest.dp,i} \\ 0 & \end{cases} \quad (3.22)$$

wobei

$t_{end,i}$ = Endzeit für die Aktivität i

$t_{earliest.dp,i}$ = Frühest mögliche straflose Endzeit für die Aktivität i

Diese Funktion definiert die Strafe für den nicht ausreichenden Aufenthalt. $\beta_{early.dp}$ soll dabei auf null gesetzt werden, falls keine verfügbaren Daten vorhanden sind.

$$U_{short.dur} = \sum_i^n U_{short.dur,i} = \begin{cases} \beta_{short.dur} (t_{short.dur,i} - t_{dur,i}) & , t_{dur,i} < t_{short.dur,i} \\ 0 & \end{cases} \quad (3.23)$$

wobei

$t_{short.dur}$ = Kürzest mögliche Aktivitätsdauer

Diese Funktion beschreibt die Strafe für eine zu kurze Aktivität. $\beta_{short.dur}$ wird wiederum auf null gesetzt, falls keine Daten zu diesem Aspekt existieren.

$U_{trav,i}$ wird folgendermaßen berechnet.

$$U_{trav,i} = \sum_i^n U_{trav,mode(i)} = C_{mode(i)} + \beta_{trav,mode(i)} t_{trav,i} + \beta_m \Delta m_i + (\beta_{d,mode(i)} + \beta_m \gamma_{d,mode(i)}) d_{trav,i} + \beta_{transfer} x_{transfer,i} \quad (3.24)$$

wobei

- $C_{mode(i)}$ = Verkehrsmittelspezifische Konstante
- $\beta_{trav,mode(i)}$ = Direkter Grenznutzen der Reisezeit mit dem Verkehrsmittel
- $t_{trav,i}$ = Reisezeit zwischen den Aktivitätsstandorten i und i+1
- β_m = Grenznutzen des Geldes (im Normalfall positiv)
- Δm_i = Änderung im monetären Budget durch Fahrgeld, oder Maut für die gesamte Strecke (im Normalfall negativ oder null)
- $\beta_{d,mode(i)}$ = Grenznutzen der Streckendistanz (im Normalfall negativ oder null)
- $\gamma_{d,mode(i)}$ = Verkehrsmittelspezifische monetäre Distanzrate (im Normalfall negativ oder null)
- $d_{trav,i}$ = Zurückgelegte Distanz zwischen Aktivitätsstandort i und i+1
- $\beta_{transfer}$ = Strafzahlungen für öffentlichen Verkehrsmitteltransfer (im Normalfall negativ)
- $x_{transfer,i}$ = 0/1 Variable, ob sich der Transfer zwischen dem vorherigen und dem aktuellen Streckenabschnitt ereignet

Diese Funktion ist der direkte Nutzenbeitrag für die Reise.

Falls andere Verkehrsmittel neben dem PKW (u. a. ÖPNV, Fahrrad etc.) nicht im Modell berücksichtigt werden sollen, gilt die folgende Zielfunktion [27, 44].

$$U_{act} = \sum_i^n U_{act,i} = \max\{U_{dur,i} + U_{waiting,i} + U_{late,i} + U_{trav,i}\} \quad (3.25)$$

Hier finden $U_{early.dp}$ und $U_{short.dur}$ keine Berücksichtigung. Dadurch ändert sich auch die Formalisierung von U_{trav} .

$$U_{trav} = \sum_i^{n-1} U_{trav,m} = \sum_i^{n-1} \beta_{trav} t_{trav,m} \quad (3.26)$$

wobei

$U_{trav,m}$ = Negativer Nutzen für die Reise auf der Fahrt m
 β_{trav} = Grenznegativnutzen der Reise
 $t_{trav,m}$ = Reisezeit für die Fahrt m

Die Parameter β_{late} , β_{dur} , β_{trav} , $\beta_{waiting}$ sowie t_i^* werden in den Aktivitätsplänen der Agenten hinterlegt. Zudem wird die früheste und späteste Startzeit sowie der späteste Geschäftsschluss für Aktivitäten bestimmt. Dabei wählt jeder Agent einen täglichen Zeitplan, die Abfahrtszeit von seinem Zuhause und die Netzwerkroute von Zuhause zu den Aktivitäten und wieder zurück so, dass er seinen Gesamtnutzen maximieren kann. Die Verhaltensmodule bestimmen die Wahl dieser Dimensionen.

Güterverkehr Jeder Güterverkehrsagent hat nach Schröder und Liedtke [137] folgende Zielfunktionen.

$$\min\{C_{fixed} + C_{act} + C_{waiting} + C_{late} + C_{transport}\} \quad (3.27)$$

wobei

C_{fixed} = Fixe Kosten des Fahrzeugs
 C_{act} = Kosten für Belieferung des Kunden
 $C_{waiting}$ = Kosten für verfrühte Ankunft beim Kunden
 C_{late} = Kosten für verspätete Ankunft beim Kunden
 $C_{transport}$ = Transportkosten aller eingesetzten Fahrzeuge

Jeder Frachtführer (jeder Entscheider) kann die folgende Auswahl zur Minimierung seiner Zielfunktion treffen.

- Tagesplan (Allokation der Kunden)
- Satz von Fahrzeugen von jedem Typen
- Depot, von dem der Kunde beliefert wird
- Sequenz der Kunden (Aktivitäten) auf der Route
- Abfahrtszeit der Fahrzeuge von ihren Depots
- Netzwerkroute zwischen den Kunden

In diesem Fall ist die Route der tatsächliche Weg durch das physische Netzwerk. Daher verfügt dieser Plan über Fahrzeugbewegungen im Raum und in der Zeit.

Die fixen Kosten des Fahrzeugs C_{fixed} werden in der Formalisierung (3.28) spezifiziert.

$$C_{fixed} = \sum_v \beta_{fixed,type(v)} \quad (3.28)$$

wobei

v = Eingesetztes Fahrzeug
 $\beta_{fixed,type(v)}$ = Fahrzeugtypabhängige Kosten

Die Kosten für die Belieferung der Kunden C_{act} werden nach der Formel (3.29) bestimmt.

$$C_{act} = \sum_v \sum_i^n \beta_{time,type} t_{act,v,i} \quad (3.29)$$

wobei

$\beta_{time,type}$ = Fahrzeugtypabhängige Kosten einer Zeiteinheit
 $t_{act,v,i}$ = Lieferzeit für ein Fahrzeug v bei der Aktivität i

Die Kosten für eine verfrühte Ankunft beim Kunden $C_{waiting}$ werden folgendermaßen definiert.

$$C_{waiting} = \sum_v \sum_i^n \beta_{time,type} t_{waiting,v,i} \quad (3.30)$$

wobei

$t_{waiting,v,i}$ = Wartezeit für ein Fahrzeug v bei der Aktivität i

Die Kosten für eine verspätete Ankunft beim Kunden C_{late} wird nach der Formel (3.31) berechnet.

$$C_{late} = \sum_v \sum_i^n \beta_{time,type} t_{late,v,i} \quad (3.31)$$

wobei

$t_{late,v,i}$ = Verspätungszeit für ein Fahrzeug v bei der Aktivität i

Die generalisierten Transportkosten aller eingesetzten Fahrzeuge $C_{transport}$ werden im Folgenden spezifiziert.

$$C_{transport} = \sum_v \sum_i^{n+1} \beta_{time,type} t_{transport,v,i} + \beta_{distance,type} d_{transport,v,i} \quad (3.32)$$

wobei

$t_{transport,v,i}$ = Benötigte Zeit des Fahrzeugs v für die Fahrt i

$\beta_{distance,type}$ = Kosten für eine Distanzeinheit

$d_{transport,v,i}$ = Zurückgelegte Distanz des Fahrzeugs v auf der Fahrt i

3.2.5. Planauswahl und Planerneuerung

Der Schritt *Replanning* ist eine Kombination aus der Planauswahl und der Planerneuerung. Die Agenten können ihre Pläne mittels der definierten Verhaltensmodelle durch das Scoring verbessern. Aus den gespeicherten Plänen kann der Agent auswählen. Dieser Plan wird modifiziert und neu aufgestellt. Der neue Plan wird dann für die nächste Iteration herangezogen.

Motorisierter Individualverkehr Das *Replanning* besteht aus mehreren Schritten.

1. Falls ein Agent mehr als die maximale Anzahl an erlaubten Plänen hat, werden Pläne nach einem Planauswahlschalter entfernt; in diesem Schritt werden schlecht bewertete Pläne gelöscht.
2. Für einige Agenten wird der Plan kopiert, modifiziert und für die nächste Iteration ausgewählt; in diesem Schritt sollen gute Pläne generiert werden.
3. Die anderen Agenten wählen zwischen ihren Plänen; in diesem Schritt werden die guten Pläne ausgewählt.

In einer Iteration kann eine Anzahl an auswählbaren Plänen berücksichtigt werden. Als Ergebnis von Schritt 1 und 2 des Replannings wird der Auswahlatz modifiziert, während Schritt 3 die eigentliche Wahl zwischen den Optionen zulässt. Die Wahl basiert in diesem Fall auf dem Score. Höhere Score-Pläne werden zu diesem Zweck ausgewählt. Daraufhin wird das *Replanning* durchgeführt, das wiederum in der *Execution* mündet. Dieser Optimierungsprozess zwischen der Mobilitätssimulation, der Bewertung der Pläne sowie der Planauswahl und Planerneuerung erfolgt iterativ und wird so lange durchgeführt, bis optimale Aktivitätspläne der einzelnen Agenten erzielt werden.

Bei der Planerneuerung werden drei Verhaltensmodelle eingesetzt: ExpBetaPlanChanger, DepTimeRescheduler und ReRouter. [8]

ExpBetaPlanChanger zieht zufällig einen Plan j vom Planspeicher und verändert den ausgewählten Plan i zum neuen Plan j mit der folgenden Wahrscheinlichkeit.

$$P_j = \min[1, 0.01 e^{0.5 \beta (f(j)-f(i))}] \quad (3.33)$$

wobei

- P_j = Wahrscheinlichkeit für neuen Agentenplan j
- $f(i)$ = Zielfunktion des Agentenplans i
- β = Sensitivität der Wahrscheinlichkeitsfunktion nach den Differenzen der Zielwerte

Falls β hoch ist, selbst wenn nur geringe Differenzen der Zielwerte bestehen, wird eine Wahrscheinlichkeit von 0 oder 1 bewirkt. In diesem Fall wird diese auf 1 gesetzt. Daher ist der Nutzwert des Plans j höher als der von Plan i . Demnach wird Plan j ausgewählt und in der nächsten Iteration simuliert.

DepTimeRescheduler ändert zufällig die Abfahrtszeit der ersten Aktivität eines alten Plans nach folgender Formalisierung.

$$t^{departure,new} = \max[t^{departure,*}, t^{departure,old} + \epsilon] \quad (3.34)$$

wobei

- $t^{departure,new}$ = Neue Abfahrtszeit der ersten Aktivität
- $t^{departure,*}$ = Früheste Abfahrtszeit
- $t^{departure,old}$ = Abfahrtszeit des alten Plans
- ϵ = Zufallsziehung aus $[-1.5 \cdot 3600, +1.5 \cdot 3600]$

Die Zeiteinheit wird hierbei in Sekunden angegeben. In diesem Modul können die Aktivitätsdauern und Abfahrtszeiten variiert werden. Zu diesem Zweck findet eine zufällige Verschiebung der Zeitpunkte statt. Dieses Modul hat einen kleinen Suchradius und wird daher nicht den ganzen Lösungsraum in 1.000 Iterationen absuchen.

ReRouter ist ein Least Cost Path Algorithmus, der die tageszeitabhängige Verkehrsbelastung und Geschwindigkeitswerte berücksichtigt. Dieser basiert auf zeit- und fahrzeugtypabhängigen Transportzeiten, die in zeitabhängigen Transportkosten resultieren. Dieser widmet sich der Variation der Reisezeiten während des Tages (durch Stauaufkommen, Stoßzeiten). Diese Kosten werden von konstanten, durchschnittlichen Transportzeiten in viertelstündigen Zeitscheiben berechnet, die als Gewichte der Kante im Modell des Straßennetzes Verwendung finden. In diesem Ansatz werden die zeitabhängigen Transportkosten mit einem modifizierten, zeitabhängigen Least Cost Path Algorithmus (LCPA), der auf dem Dijkstra Algorithmus [8, 96] beruht, berechnet. Der Dijkstra-Algorithmus dient zur Suche nach den kürzesten Wegen. Dementsprechend kann er mit tageszeitabhängigen Kantengewichten operieren. Zunächst werden die Reisezeiten auf den Streckenabschnitten aus den Ereignissen des vorherigen Simulationslaufs des Verkehrsflusses abgeleitet. Der schnellste Weg von einer Aktivität zur anderen wird auf Basis gegebener Abfahrtszeiten bestimmt. In diesem Modul wird die Abfahrtszeit nicht variiert. Dies erfolgt im Zeitwahlmodul. [105, S. 13]

Güterverkehr Bei der Optimierung der Transportkosten im Vehicle Routing Problem gelten nach Schröder et al. [140] folgende Nebenbedingungen.

- Die Belieferungsfahrten zu den Kunden beginnen beim jeweiligen Distributionszentrum.
- Die Belieferungsmengen an die Kunden sind im Voraus bekannt.
- Die Auslieferzeiten der Belieferungen können durch Zeitfenster beschränkt werden.
- Jedem Frachtführer wird ein Fuhrpark zugewiesen, der aus unterschiedlichen Fahrzeugtypen besteht. Die Fahrzeugtypen unterscheiden sich hinsichtlich Kapazität und Kosten.
- Alle Fahrzeuge starten und enden beim Distributionszentrum.
- Einem Fahrzeug kann höchstens eine Route pro Tag zugewiesen werden.

Das Verhalten des Frachtführers wird durch heuristische Modellierung abgeleitet.

- Ein Vehicle Routing Algorithmus (VRA) bestimmt die Flottengröße, Fahrzeugtypen, Depots, Routen und Abfahrtszeiten vom Depot.
- Der zeitabhängige Least Cost Path Algorithmus (LCPA) verfügt über die Transportkosten und -zeiten für die Fahrzeuge, um von einem zum anderen Standort zu gelangen.

Beispielsweise wählt der Güterverkehrsentscheider mittels eines Logit-Modells einen alten Plan aus und modifiziert diesen auf Grundlage der Netzwerkumlegung der letzten Iteration mittels eines Vehicle Routing Algorithmus (VRA). Dies führt zu einer Veränderung der Aktivitätensequenz und Fahrzeugauswahl. Zudem wird der zeitabhängige Least Costs Path Algorithmus zum Finden des besten Weges im Netzwerk angewendet. Zu diesem Zweck wird immer der Plan der letzten Iteration herangezogen.

Schröder und Liedtke [137] setzen bei der Planerneuerung vier Verhaltensmodelle ein: ExpBetaPlanChanger, DepTimeRescheduler, ReRouter und VehicleReRouter. Die ersten drei Modelle werden von Balmer et al. [8] übernommen.

VehicleReRouter löst das Vehicle Routing Problem („Problem des Handlungsreisenden“) des Güterverkehrsentscheiders heuristisch mittels zwei grundlegender Algorithmen, dem Vehicle Routing Algorithmus (VRA) und dem zeitabhängigen Least Cost Path Algorithmus (LCPA). Letzterer stellt die notwendigen Transportkosten und -zeiten für die Fahrzeuge zur Verfügung, um von einem Standort zum anderen Standort zu gelangen. In diesem Fall wird derselbe Algorithmus genutzt, der bereits im ReRouter-Modul beschrieben wurde. Der VRA bestimmt die Flottengröße, Fahrzeugtypen und Aktivitätensequenz.

Die grundlegende Idee basiert auf Schrimpf et al. [134], der das Ruin-and-Recreate-Prinzip formulierte. Dieses Prinzip ist eine Large-Neighborhood-Suche, die Elemente des Simulated Annealings und des Threshold-Accepting Algorithmus kombiniert [134, S. 142]. Die initiale Lösung, der alte Plan, der modifiziert wird, wird in seine Bestandteile aufgelöst, mündend in

1. einen Satz von Kunden, die nicht mehr durch ein Fahrzeug beliefert werden und
2. eine Teillösung, die alle anderen Kunden beinhaltet.

Dieser Schritt wird als Ruin-Schritt bezeichnet. Im Detail gehen Schröder und Liedtke [136] folgendermaßen vor.

Die *Ruin-Strategie* wird als zufällig und als *radialer Ruin* bzw. *Radial Ruin* in Anlehnung an Schrimpf et al. [134] und der *Flottenruin* bzw. *Fleet Ruin* basierend auf Gendreau et al. [60] integriert.

- *Random Ruin*: Diese Strategie zerstört eine mögliche Lösung eines Vehicle Routing Problems zufällig. Beispielsweise wird die Anzahl der Kunden nach einem Zufallszahlengenerator identifiziert und von der Lösung entfernt.
- *Radial Ruin*: Diese Strategie zerstört eine gegebene Lösung systematischer. Ein Kundenknoten wird zufällig als Zielkunde ausgewählt. Dieser Kunde und seine benachbarten Kunden werden von der Lösung entfernt. Der Nachbar wird als Kunde definiert, der am nächsten zum Zielkunden liegt. In diesem Fall wird die euklidische Distanz genutzt.
- *Fleet Ruin*: Diese Strategie basiert auf einem Flottenänderungsverfahren nach Gendreau et al. [60], die eine starke Diversifizierungsstrategie einführen. Dabei wird eine Route r , die nur zwei Kunden hat, ausgewählt. Alle Kunden von r werden von der Lösung entfernt. Zudem wird einer dieser Kunden zufällig ausgewählt und seine Nachbarschaft entfernt (nach der Radial Ruin-Strategie), sodass er sich mit anderen Kunden in r überlappen kann. Um einen leicht modifizierten Radial Ruin zu vermeiden und eine Flottenveränderung zu begünstigen, werden zwei neue Routen r' , r'' in der Teillösung eingeführt. Jede dieser zwei Routen beinhaltet einen initialen Kunden (aus einem Satz von Kunden, die initial zu r gehören) und das kostengünstigste Fahrzeug.

Im Allgemeinen sind n Kunden in einem Satz N aller Kunden und einem Anteil f von Kunden, die entfernt werden sollen. Die Anzahl der entfernten Kunden ist hierbei $f n$. Dies ergibt die Teillösung \bar{N} , die aus $(1 - f)n$ Kunden und einem Satz von \bar{N} mit $f n$ Kunden, die nicht mehr in der Lösung sind. Letztere werden später wieder in die Teillösung integriert. Basierend auf der Teillösung (2) werden alle Kunden von (1) reintegriert.

Aufgrund dessen wird dieser Schritt als Recreation definiert. [136] Die *Recreation-Strategie* basiert auf Schrimpf et al. [134]. Dabei werden $f n$ Kunden umbesetzt und nacheinander in die existierende Lösung integriert. Lass k der Kunde, der als nächstes integriert werden soll, sein. Für jede Route r in der bestehenden Lösung wird die beste Einsatzposition für k bestimmt, sodass die Einsatzkosten minimal sind. Diese Strategie wird auch *Best Insertion* genannt. Um nun verschiedene Fahrzeugstandorte, Fahrzeugtypen und Abfahrtszeiten vom Depot zu berücksichtigen, wird das Einsetzen von k nicht nur nach der bestehenden Route r , sondern nach der leicht modifizierten Routenkonfiguration evaluiert. Bestehende Routen werden z. B. mit anderen Fahrzeugen durchgeführt

oder sie verlassen das Distributionszentrum früher oder später. Der meist intuitive Weg für den Einsatz von k wird dabei durch die Identifizierung der Abfahrtszeit, des Fahrzeugtyps und der Position innerhalb der bestehenden Lösung \bar{S} ausgewählt. Wobei die zusätzlichen Kosten bedingt durch den Einsatz von k minimiert werden und k auf dieser Position eingesetzt wird. Diese zusätzlichen Kosten werden folgendermaßen formalisiert.

$$\Delta_C = \Delta_C(\bar{S} \cup k) - C(\bar{S}) = [C_F(\bar{S} \cup k) + C_V(\bar{S} \cup k)] - [C_F(\bar{S}) + C_V(\bar{S})] \quad (3.35)$$

wobei

$$\Delta_C = \Delta_{C_F} + \Delta_{C_V} \quad (3.36)$$

Zusätzliche Fixkosten werden mit dem Ansatz nach Dell'Amico et al. [31] bestimmt. Sie wählen einen neuen Fahrzeugtyp und ordnen die resultierenden, zusätzlichen Fixkosten dem Kunden k , in Abhängigkeit der Vollständigkeit der Lösung, zu. Falls noch ein signifikanter Anteil an Kunden eingesetzt werden muss, werden Fahrzeuge mit geringen Fixkosten pro Leistungsverhältnis (relative Fixkosten) bevorzugt. Dabei werden meist die größeren Fahrzeuge ausgewählt. Somit wird die Gesamtkapazität vergrößert. Falls bereits annähernd alle Kunden in die Lösung integriert wurden, werden Fahrzeuge mit geringen, absoluten Fixkosten (kleine Fahrzeuge) bevorzugt. Somit wird die Gesamtkapazität entsprechend gering gehalten.

Zusätzliche Grenzkosten werden auf der Routenebene ausgewertet. Dabei hat die Integration von k nicht nur eine lokale Auswirkung auf seine benachbarten Kunden, sondern auch auf die vorherigen und nachfolgenden Kunden. Nachdem der Kunde k an seiner besten Position integriert wurde, werden die Zeitfenster aktualisiert [134]. Dies führt zu einer neuen Lösung. Falls die neue Lösung eine bestimmte Qualität hat, wird sie als neue beste Lösung akzeptiert, woraus eine neue Ruin-and-Recreate-Iteration startet. Diese Schritte werden solange wiederholt, bis eine finale Lösung erreicht wird.

Die *Akzeptanzfunktion* akzeptiert jede neue Lösung, die besser als die aktuell beste Lösung ist. Aufgrund der innewohnenden Fähigkeit des Algorithmus, komplett neue Nachbarschaftsstrukturen aufzubauen, generiert dieser angemessene Lösungen.

Im *Replanning* werden die Pläne anhand der Bewertung — falls notwendig — durch neue Pläne ersetzt. Hier kann jeder Agent seinen Plan verbessern, indem er ihn modifiziert. Basierend auf seiner Erfahrung aus der vorhergehenden Iteration wählt er z. B. eine andere Route, ein anderes Verkehrsmittel oder er kann die Abfahrtszeiten der jeweiligen Aktivitäten verschieben bzw. verändern. In Bezug auf den Güterverkehr ist es sogar möglich, eine neue Aktivitätensequenz zu wählen.

Der Ansatz nach Schröder und Liedtke [137] erlaubt zudem die Berücksichtigung von Personen- und Güterverkehrsagenten auf einem Netzwerk, die somit miteinander interagieren und sich gegenseitig beeinflussen.

Final stellt sich im Rahmen eines iterativen Prozesses ein Verkehrsflussgleichgewicht, die *Relaxed Demand*, ein, bei dem die Verkehrsagenten in ihrem individuellen Optimum agieren. Diesem Optimum nähern sie sich iterativ durch den genannten heuristischen Verbesserungsprozess an. [137] Hierbei gibt die Relaxierung Durchschnittswerte des Nutzens der Aktivitätspläne bzw. seiner Komponenten an. Das System gilt als relaxiert,

wenn sich der Nutzen der ausgeführten Pläne $U_{plan,exec}$ nicht mehr verbessert. Abschließend können die Ergebnisse im Detail analysiert werden. [8, S. 11]

Um nun die Sensitivität des Modells aufgrund von Verkehrsplanungsmaßnahmen zu analysieren, konzentrieren sich Schröder et al. [140] in ihrem Fallbeispiel auf folgende Maßnahmen innerhalb der Umweltzone Berlins.

- Cordon-Maut für schwere LKW
- Distanzabhängige Maut für schwere LKW
- Einfahrverbot für schwere LKW
- Nachtfahrverbot zum Lärmschutz für schwere LKW

Dadurch wird die Kostenfunktion des Güterverkehrsagenten beeinflusst. Dies führt zu anderen Gleichgewichten. Mittels der Nutzen-Kosten-Analysen ergeben sich für den Agenten veränderte logistische und verkehrliche Entscheidungen.

Demzufolge werden verhaltenslenkende Maßnahmen zur Veränderung des logistischen Verhaltens untersucht. Mittels des Optimierungsmodells gelingt die Abbildung des logistischen Disponenten. Sie modellieren die Relationen und die Kostenveränderungen. Die Kopplung mit der Verkehrssimulation (in diesem Fall MATSim) ermöglicht die Darstellung der räumlichen und zeitlichen Effekte.

Nachteil dieses Ansatzes ist, dass es bisher nicht gelungen ist, das entwickelte Optimierungsmodell empirisch zu verifizieren und dementsprechend zu kalibrieren.

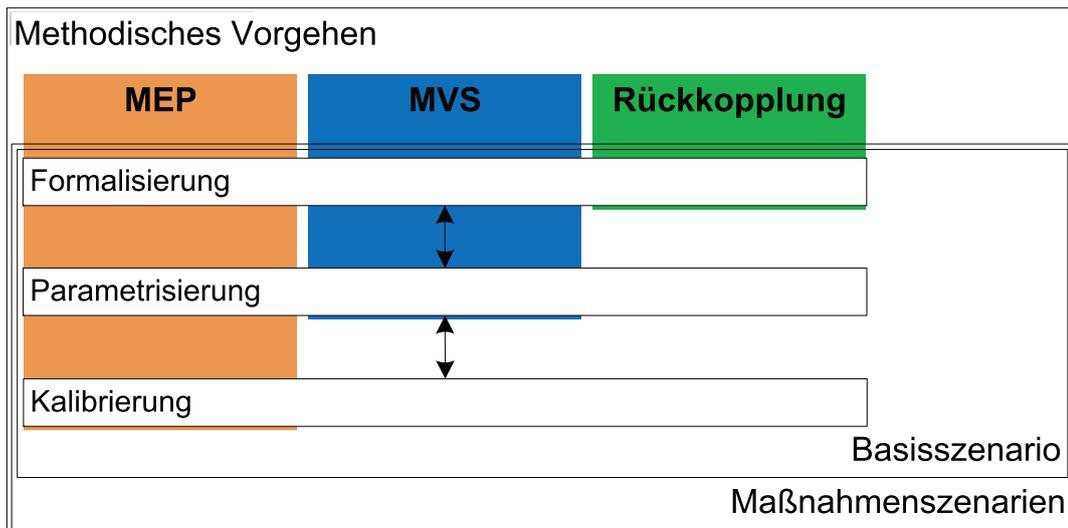


Abbildung 3.4.: Methodisches Vorgehen zur Entwicklung des Rückkopplungsansatzes.

3.3. Methodisches Vorgehen zur Entwicklung des Rückkopplungsansatzes

Zur Entwicklung und Operationalisierung des Rückkopplungsansatzes wird im Folgenden das methodische Vorgehen erläutert. Zunächst wird die Problemstellung und Zielsetzung des Modellierungsansatzes definiert. Hierbei wird bereits der Untersuchungsgegenstand und der Untersuchungsraum zur Umsetzung des Rückkopplungsansatzes im Rahmen eines Fallbeispiels bestimmt. Mittels einer umfassenden Literaturanalyse wird der Untersuchungsgegenstand untersucht. Der Rückkopplungsansatz besteht dabei aus drei Komponenten, der MEP, der MVS und der Rückkopplung. Die Rückkopplung ist als Schnittstelle zwischen der MEP und der MVS zu verstehen, die jeweils die Aggregation und die Disaggregation vornimmt. Die jeweiligen Schritte, die für die MEP (orange), die MVS (blau) und die Rückkopplung (grün) vorgenommen werden müssen, werden in Abbildung 3.4 aufgezeigt. Um das Basisszenario des Rückkopplungsansatzes umzusetzen, wird die Formalisierung des Modells vorgenommen. Basierend darauf erfolgt die Parametrisierung der MEP und der MVS. Die Kalibrierung wird in der vorliegenden Arbeit nur für die MEP durchgeführt. Danach wird das Basisszenario um ausgewählte Maßnahmen erweitert. Dabei müssen die zuvor erwähnten Schritte Formalisierung, Parametrisierung und Kalibrierung zur Entwicklung der Maßnahmenzenarien erneut durchgeführt werden. Final werden die Simulationsergebnisse der Maßnahmenzenarien mit denen des Basisszenarios verglichen und ausgewertet.

Dieses methodische Vorgehen wird im folgenden Teil III zur Umsetzung des Fallbeispiels zum Thema KEP-Markt in Berlin verfolgt.

Teil III.

Fallbeispiel

In diesem Teil wird die Operationalisierbarkeit des in Kapitel 2.4 präsentierten Kopplungsansatzes im Rahmen eines Fallbeispiels zum Kurier-, Express- und Paketmarkt (KEP-Markt) in Berlin unter Beweis gestellt. Zu diesem Zweck wird zunächst in Kapitel 4 der Untersuchungsgegenstand des Fallbeispiels, der KEP-Markt, und seine Relevanz in urbanen Räumen herausgestellt. Danach erfolgt, wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, die Formalisierung des Rückkopplungsansatzes (siehe Kapitel 5), die Parametrisierung der verwendeten Modellierungsinstrumente SD und MVS (siehe Kapitel 6) und die Kalibrierung des SD-Modells (siehe Kapitel 7). Daraus resultiert ein simulationsfähiges Basisszenario. In Kapitel 8 werden ausgewählte verkehrspolitische und logistische Maßnahmen ausgewählt und definiert. Zu diesen Maßnahmen werden Szenarien entwickelt, die eine Erweiterung des Basisszenarios darstellen. Wie bereits das Basisszenario, werden auch diese Szenarien formalisiert, parametrisiert und kalibriert. Abschließend werden in Kapitel 9 die Simulationsergebnisse des Basisszenarios und der Maßnahmen szenarien präsentiert und kritisch diskutiert.

4. Untersuchungsgegenstand

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen zur Analyse und Modellierung des KEP-Verkehrs in urbanen Räumen gegeben. Dazu ist es zunächst notwendig, den KEP-Verkehr als Teil des Wirtschaftsverkehrs abzugrenzen. Zu diesem Zweck wird im Folgenden der *Wirtschaftsverkehr* definiert.

4.1. Wirtschaftsverkehr

Nach Arndt [4], Flämig und Hertel [47], Frey et al. [55], Schwerdtfeger [143], Steinmeyer [151] sowie Thaller et al. [162] lässt sich der Wirtschaftsverkehr als der Verkehr verstehen, der im Rahmen beruflicher bzw. erwerbswirtschaftlicher und dienstlicher Tätigkeiten entsteht. Er unterscheidet sich dadurch vom individuellen Personenverkehr, der auf Basis individueller Bedürfnisse erfolgt. Es handelt sich um Ortsveränderungen bzw. den Transport von sowohl Gütern als auch Personen mittels verschiedener Verkehrsmittel auf verschiedenen Verkehrsträgern auf verschiedenen räumlichen Ebenen. Diese Verkehre werden durch ökonomische Aktivitäten von Unternehmen und Privatpersonen erzeugt. Voraussetzung für diese Verkehre ist, dass diese Aktivität innerhalb der beruflichen Arbeitszeit geleistet wird. Der Wirtschaftsverkehr stellt eine Grundlage zur Versorgung von Unternehmen und Privathaushalten mit Gütern und Dienstleistungen dar.

Da der Wirtschaftsverkehr sehr heterogen ist, wird dieser in Abbildung 4.1 in homogene Segmente nach dem „beförderten Objekt“ unterteilt.

Der *Personenwirtschaftsverkehr* umfasst die Transporte von Menschen in Ausübung ihres Berufs. Dieses Segment lässt sich nach der Tätigkeit am Einsatzort in *Dienst- bzw. Geschäftsreiseverkehr* und *Dienstleistungsverkehr* differenzieren. Dazu zählt auch der Personenbeförderungsverkehr im ÖPNV. Dementsprechend sind Dienst- und Geschäftsreiseverkehre als Geschäftsfahrten ohne Güterbeförderung definiert. Ferner sind Dienstleistungsverkehre Fahrten von Dienstleistungsbetrieben — ohne Güterbeförderung. Hierzu zählt auch die Personenbeförderung. Hierbei erfolgt eine Dienstleistung am Einsatzort.

Nach Steinmeyer [151] wird der *Güterwirtschaftsverkehr* in *gewerblichen Güterwirtschafts-* und *Werkverkehr* unterteilt. Güterwirtschaftsverkehre sind in logistische Netzwerkstrukturen eingebunden und weisen daher komplexe Fahrtenmuster auf. Vornehmlich dient der gewerbliche Güterwirtschaftsverkehr zur Güterbeförderung. Berücksichtigt werden hierbei Gütertransporte zwischen Unternehmen und Warentransporte bis zum (End-)Kunden sowie die Entsorgungsverkehre. Die Transportdurchführung übernehmen dabei Logistikdienstleister (u. a. Speditionen, Transportunternehmen). Demzufolge werden diese Verkehre im Auftrag von anderen durchgeführt.

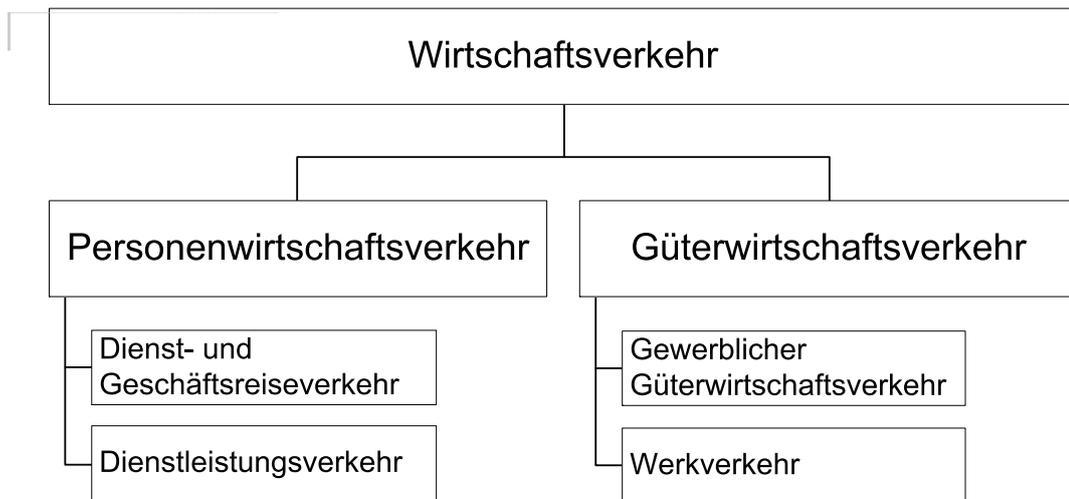


Abbildung 4.1.: Differenzierung des Wirtschaftsverkehrs (Eigene Darstellung nach [4], [47], [55], [143], [151], [162]).

Der Werkverkehr ist hingegen der Eigenverkehr von Industrie und Handel, der zur Beförderung der eigenen Güter für eigene Rechnung entsteht.

In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus vornehmlich auf dem *gewerblichen Güterwirtschaftsverkehr*, der als *Güterverkehr* abgekürzt wird.

4.2. Güterverkehrsmärkte

Der gesamte Güterverkehrsmarkt ist sehr heterogen und lässt sich in verschiedene Segmente einteilen. Klaus et al. [82, S. 354] sprechen hierbei vom Logistikdienstleistungsmarkt. Sie unterteilen diesen Markt in 16 Segmente, die inhaltlich jedoch nicht trennscharf sind. Schwemmer [142, S. 43] dagegen differenziert diesen Markt in 13 Segmente, die die logistischen Funktionsbereiche (u. a. Transport, Lager) und Verkehrsträger (u. a. Straße, Schiene, Wasser und Luft) berücksichtigen. Die Differenzierung dieses Marktes nach Schwemmer [142, S. 43] wird in Abbildung 4.2 aufgezeigt.

Diese Übersicht zeigt die drei übergeordneten Märkte Ladungs-, Stückgut- und grenzüberschreitende Verkehre. Die grenzüberschreitenden Verkehre sind für diese Arbeit nicht von Relevanz, da der räumliche Fokus auf nationalen Verkehren liegt. Zudem ist festzuhalten, dass der KEP-Verkehr ein spezielles Segment des Stückgutmarktes ist. Um nun die besonderen Attribute des KEP-Verkehrs herauszustellen, wird eine Abgrenzung zum Ladungs- und traditionellen Stückgutverkehr vorgenommen (siehe Tabelle 4.1).

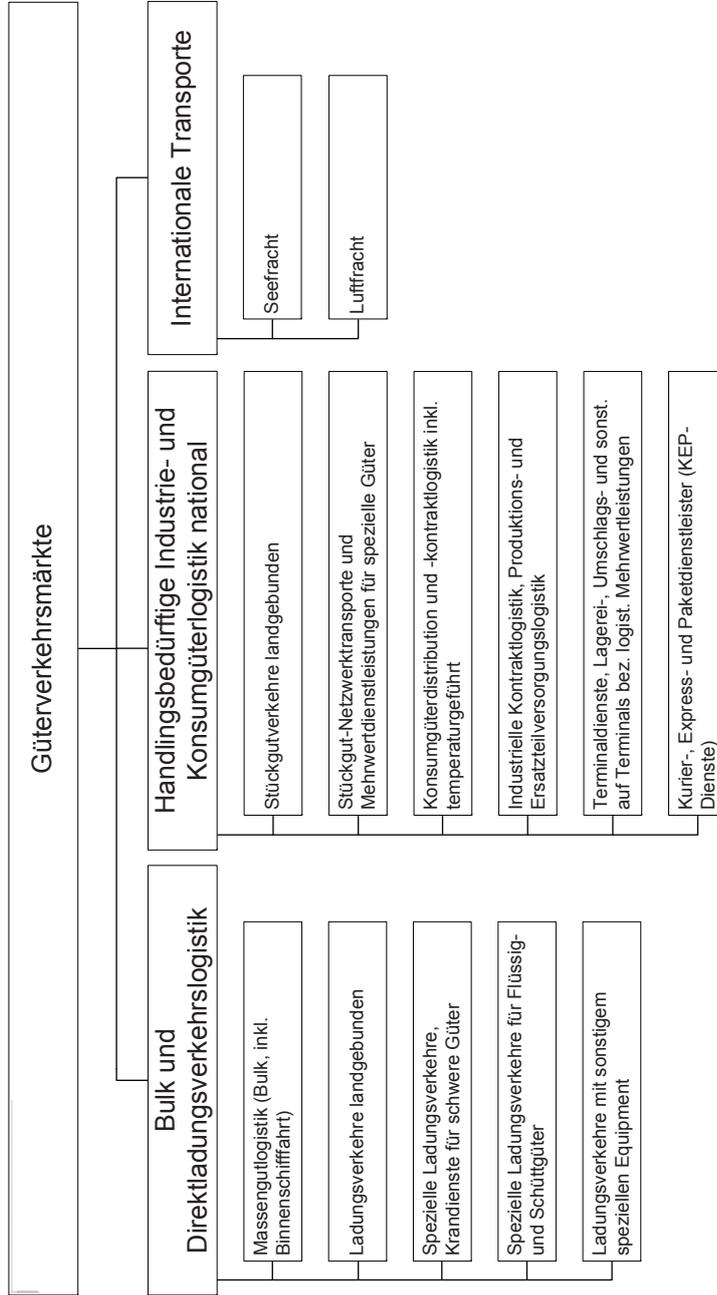


Abbildung 4.2.: Segmentierung des Güterverkehrsmarktes (Eigene Darstellung nach Schwemmer [142, S. 43]).

Tabelle 4.1.: Charakterisierung der Logistikteilmärkte (Eigene Darstellung nach Kille [81, S. 263ff], Klaus et al. [85, S. 9, 499, 573]).

Charakteristika	KEP-Verkehr	Stückgutverkehr	Ladungsverkehr
Transportobjekte	Kleinstückige Güter	Abgepackte und individuell etikettierte Trocken- und Stapelgüter	Trocken- und Stapelgüter, Massengüter
Sendungsgrößen	2–31,5 kg	31–2.500 kg	2,5–25 t
Auftraggeberbranchen	Business-to-Business (B2B), Business-to-Consumer (B2C), Consumer-to-Consumer (C2C)	Industrie, Konsumgüterwirtschaft (B2B)	Handel, Industrie (B2B)
Transportmittel	Lastenfahräder, LKW mit 3,5 bis 7,5 t zul. GG. für Nahverkehr (Vor- und Nachlauf); LKW mit 7,5 bis 40 t zul. GG. oder Flugzeug für Fernverkehr im Hauptlauf	LKW mit 3,5 bis 7,5 t zul. GG. für Nahverkehr (Vor- und Nachlauf); LKW mit 7,5 bis 40 t zul. GG. für Fernverkehr im Hauptlauf	LKW, Bahn mit speziellen Planen- und Kofferverkehrsmitteln
Ladeeinheiten	Paketeinheiten (PE), Paletten	Paletten, Stückgüter	Container, spezialisierte LKW
Verkehrsnetzstrukturen	Direktverkehrsnetz, Hub- and Spoke-Netz	Direktverkehrsnetz, Hub- and Spoke-Netz	Direktverkehrsnetz
Funktionszusammenhänge	Nah-, Regional-, Fernverkehr	Nah-, Regional-, Fernverkehr	Fernverkehr
Transportkonzept	Direktbelieferung, Sammelgutverkehr	Sammelgutverkehr	Direktbelieferung, Punkt-zu-Punkt-Linienverkehre
Transportkette	Vor-, Haupt- und Nachlauf	Vor-, Haupt- und Nachlauf	Rampe-zu-Rampe-Ladungsverkehr
Verkehrsträger	Straße, Luft	Straße	Straße, Schiene

4.3. Kurier-, Express- und Paketmarkt

Nach der Abgrenzung des KEP-Verkehrs zu den weiteren Teilmärkten des Güterverkehrs wird im Folgenden dieses Segment im Detail beleuchtet. Nach dieser Gegenüberstellung ist erkennbar, dass die Hauptmerkmale des KEP-Verkehrs im Vergleich zu den anderen Teilmärkten an der Kleinteiligkeit und der geringen Sendungsgröße (sowohl Gewicht als auch Volumen) der transportierten Güter liegen. Zudem ist festzustellen, dass dieser Teilmarkt als einziger im Vergleich die Kundenbranchen B2C und C2C abdeckt. Dies bedeutet, dass dieser neben gewerblichen Kunden auch den privaten Endkonsumenten als Kunden mit Gütern versorgt. Gewerbliche Auftraggebergruppen sind u. a. Versandhandels- und Direktvertriebsunternehmen, die *Business-to-Business* (B2B) oder *Business-to-Consumer* (B2C) beliefern. Zudem gehören zu den gewerblichen Kunden auch Unternehmen aus Industrie, Handwerk und Dienstleistung, die kleinvolumige Materialien, Ersatzteile und Dokumente versenden. Ferner können Privatpersonen diese Dienstleistung nutzen, die Pakete von *Consumer-to-Consumer* (C2C) versenden. [81, S. 263f]

Die Anbieter auf diesem Markt können nach Kille [81, S. 264] in folgende Typen differenziert werden.

- Anbieter mit eigener Flugzeug- und LKW-Flotte sowie eigenen Umschlagterminals: Abdeckung aller Stufen der Wertschöpfungskette
- Paketdienste: Anbieten eines flächendeckenden, landbasierten Netzwerks
- Kleine und mittlere Unternehmen: Auslieferung regionaler oder lokaler Sendungen

Kleinere Sendungen als 2 kg werden von der Post- und Mail-Logistik ausgeführt, die in diesem Kontext nicht zu diesem Markt zählt.

Dieser Markt kann nach Kille [81, S. 264f] sowie Stölzle und Fagagnini [154, S. 33] in die folgenden drei Teilmärkte unterteilt werden, die sich jeweils wie folgt charakterisieren lassen (siehe Abbildung 4.3).

Kurier-, Express- und Paketmarkt			
	Kurierdienste	Expressdienste	Paketdienste
Transportobjekte	Dokumente, Datenträger, hochempfindliche Kleinteile, Ersatzteile oder Muster	Dokumente, Stückgut	Stückgut
Sendungsgrößen	Sendungsgewicht bis zu 1,5 kg	Sendungsgewicht bis zu 31,5 kg	Sendungsgewicht bis zu 31,5 kg
Transportmittel	Lastenfahräder, LKW mit 3,5 bis 7,5 t zul. GG	Lastenfahräder, LKW mit 3,5 bis 7,5 t zul. GG. für Nahverkehr; LKW mit 7,5 bis 40 t zul. GG. oder Flugzeug für Fernverkehr	Lastenfahräder, LKW mit 3,5 bis 7,5 t zul. GG. für Nahverkehr; LKW mit 7,5 bis 40 t zul. GG. oder Flugzeug für Fernverkehr
Verkehrsnetzstrukturen/ Transportkonzept	Direktbelieferung ohne feste Netzwerke und Linien	Hub- and Spoke-Netzwerk mit Sammelgutverkehr	Nationales und internationales Hub- and Spoke-Netzwerk mit Sammelgutverkehr
Funktionszusammenhänge	Nah-, Regionalverkehr	Nah-, Regional-, Fernverkehr	Nah-, Regional-, Fernverkehr
Einsatzgebiet	Lokales, regionales und nationales Einsatzgebiet	Nationales und internationales Einsatzgebiet	Nationales und internationales Einsatzgebiet
Transportzeit	Auslieferung am selben Tag oder nach individueller Vereinbarung	Schnelle, tag- und uhrzeitgenaue Zustellung sowie Haus-zu-Haus-Service (Sameday-, Inntight-, Next Day- und Overnight-Zustellung)	Nationale Belieferungszeit: 1 - 2 Tage; internationale Belieferungszeit: 1 Woche
Dienstleistungsgrad	Persönliche und direkte Begleitung der Sendung	Beförderung von Einzelsendungen ohne persönliche Begleitung; Termingarantie für den Kunden	Keine fest vereinbarten Zustelzeiten; keine Termingarantie für den Kunden
Unternehmensgröße	Kleinbetriebe	Nationale mittelgroße und internationale Großbetriebe	Internationale Großbetriebe

Abbildung 4.3.: Differenzierung des KEP-Marktes (Eigene Darstellung nach Kille [81, S. 264f] sowie Stölze und Fagagnini [154, S. 33]).

4.4. Relevanz des KEP-Verkehrs in urbanen Räumen

Seit 1950 nehmen urbane Räume als soziale und ökonomische Anziehungspunkte sowie als Drehkreuze für Verkehr und Logistik stetig an Bedeutung zu. Diese Reurbanisierungstendenzen zeichnen sich weltweit über ein exponentielles Wachstum der Bevölkerung und zunehmende ökonomische Aktivitäten aus. Prognosen zufolge werden mehr als 70 Prozent der Weltbevölkerung 2050 in urbanen Ballungsräumen leben. [112, S. 2] Dabei muss der Bedarf an Güterversorgung und Mobilität der urbanen Bewohner gewährleistet werden. Auch die Leistungsfähigkeit der urbanen Wirtschaftsakteure muss nachhaltig gesichert werden, um die ökonomische Prosperität der Städte zu bewahren. Zur langfristigen Erhaltung dieser Grundbedürfnisse sind funktionierende Verkehrs- und Logistiksysteme maßgebliche Grundvoraussetzungen.

Zudem ist ein Wandel von Verbrauchergewohnheiten zu beobachten, der sich mit steigender E-Commerce-Nachfrage von Privathaushalten nachweisen lässt. In der Industrie und im Handel werden verschiedene Logistikstrategien verfolgt. Hierbei ging der Trend in den letzten Jahren hin zu einer Reduzierung des Lagerbestands, um Kapitalbindungs- und Verwaltungskosten sowie Lager-, Personal- und Transportkosten innerhalb eines Unternehmens einzusparen.

Um dementsprechend die steigende Nachfrage privater und gewerblicher Kunden nach kleinteiligen Gütern zu erfüllen, sind im Güterverkehr flexible, hochfrequentierte und kleinteilige Belieferungen erforderlich. Die daraus resultierende, erhöhte Lieferfrequenz führt zu einer signifikanten Zunahme der Güterverkehrsnachfrage, die einen hohen Anteil an Fahrten kleiner und mittlerer Lastfahrzeuge aufweist. Aufgrund dessen steigt das Verkehrsaufkommen und damit die Belastung auf die Verkehrsinfrastruktur. Infolgedessen nehmen die Beeinträchtigungen auf die Umwelt einerseits und auf die Verkehrsflüsse andererseits, die aus den häufigen Halten dieser Nutzfahrzeuge resultieren, zu.

Gerade der Kurier-, Express- und Paket-Markt (KEP-Markt) profitiert von diesen Entwicklungstendenzen. In den letzten Jahren stieg sein Anteil am gesamten Logistikmarkt signifikant an. Auch für die zukünftige Entwicklung wird ihm ein hohes Wachstumspotential prognostiziert [81, S. 267f]. Damit zählt der KEP-Markt zu den schnellst wachsenden und dominantesten Logistikmärkten. Nach Sonntag [147, 148] sind die Haupterzeuger des städtischen Wirtschaftsverkehrs KEP-Dienste, Stückgutverkehr, Filialketten und Shopping, Warenhaus, Bau und Handwerk, Produktion und Industrie sowie Spezialistenverkehre. Bereits 2010 hatte der KEP-Verkehr einen Anteil von 38 Prozent am gesamten, urbanen Güterverkehrsaufkommen inne [147, 148]. In nahezu allen Wirtschaftszweigen substituiert der KEP-Verkehr die Belieferung von Industrie- und Handelsunternehmen.

Auf der *Letzten Meile* werden die Endkunden im B2C- oder C2C-Segment vom KEP-Dienstleister beliefert. Die Herausforderungen liegen dabei in der hohen räumlichen Verteilung der Senken, in diesem Fall der Endkunden. Hierbei fällt der Stoppfaktor, die Anzahl der ausgelieferten Sendungen pro Stopp, des Zustellfahrzeuges sehr gering aus. Dadurch müssen hohe Stoppkosten eingeplant werden, die bei der Übergabe der Sendungen an den Empfänger entstehen. Gerade im Privatkundensegment werden durch die geringe Anzahl an Sendungen pro Empfänger besonders hohe Stoppkosten verur-

sacht [85, S. 535]. Für die Letzte Meile-Distribution fallen im KEP-Markt ca. 50 Prozent der Gesamttransportkosten an. Die Belieferungsform auf der Letzten Meile lässt sich in *Hausbelieferung* und *Abholpunktbelieferung* differenzieren. Aktuell wählen mehr als 50 Prozent der Privatkunden die Hausbelieferung. Negativ wirken sich dabei die Mehrfachanfahrten auf die Zustellkosten aus. Zur Vermeidung dieser Kosten sollten mit dem Privatkunden auch Lieferzeitfenster vereinbart werden. [85, S. 311]

Für das B2B-Segment kommt vorwiegend die Hausbelieferung während der Geschäftszeiten zum Einsatz. Bei der *Innighit-Expressdienstleistung* werden *gesicherte Abstellplätze*, Container, Boxen, Räume und Kundendienstfahrzeuge genutzt. Gerade Betriebe, die auf Ersatzteillieferung angewiesen sind, nutzen vornehmlich diese Dienstleistung. Im B2B-Sektor findet zudem die Abholpunktbelieferung Anwendung. Hierbei wählen die Empfänger einen bestimmten Abholort (z. B. Tankstellen, Kioske) zu einer bestimmten Zeit (auch Nachtbelieferung) aus, an denen die Sendung zugestellt wird. Vorteile bei dieser Belieferung sind Bündelungseffekte und die Reduzierung von Zustellversuchen. Zudem gibt es noch Abholpunkte (Paket-Silos) (u. a. „Shopping Box“, „Tower24“), in der die Waren deponiert werden und gegen Entgelt vom Empfänger abgeholt werden können. [85, S. 311]

Die Herausforderungen für die KEP-Dienstleister liegen insbesondere im Vor- und Nachlauf in dicht besiedelten, urbanen Räumen, in denen ein großes Güternachfragepotential im Privatkundensegment vorzufinden ist. Gerade der E-Commerce ist hierbei Treiber der kleinteiligen und hochfrequentierten Sendungsstrukturen dieses Marktes. Die private Nachfrage stellt insofern ein Planungsproblem im Tagesgeschäft dar, da diese kaum vorhersagbar und planbar ist. Die Vielzahl an Senken, hier die Privatkunden, unterscheiden sich dabei von Tag zu Tag. Die zu beliefernden Senken sind für den KEP-Dienstleister jeweils zufällig und hoch dynamisch.

Jedoch hat das Güterverkehrsaufkommen des KEP-Verkehrs in Städten auch negative Effekte auf die Lebens-, Verkehrs- und Umweltqualität. In diesem Zuge entstehen Interessenskonflikte zwischen den relevanten Akteuren aus der Verkehrssystemgestaltung. Die Erhaltung und Verbesserung der Lebensqualität und des Stadtklimas erfordert verträgliche Lösungen zur Steigerung der Effizienz städtischer Verkehrs- und Logistiksysteme [157]. Eine Kompensation der Diskrepanzen zwischen diesen sozialen, ökologischen und ökonomischen Zielsetzungen sowie eine effiziente und nachhaltige Gestaltung des zunehmenden, urbanen Güterverkehrs setzt eine umfassende Strategieplanung voraus. Hierfür ist eine forcierte Zusammenarbeit dieser Akteure notwendig [10]. Nach Flämig und Hertel [46] sind dies

- Akteure mit politischer und administrativer Verantwortung (u. a. Bund, Länder, Städte und Kommunen, Fachplanungsträger),
- betriebliche Akteure (u. a. Wirtschafts- und Logistikunternehmen),
- Interessensvertreter (u. a. Industrie- und Handelskammern, Verkehrs- und Fachverbände) und
- zivilgesellschaftliche Akteure (u. a. Bürgerinitiativen, Umweltverbände).

Um diesen Zielkonflikten entgegenzuwirken, verfügt zwar die Verkehrspolitik über umfassende Verkehrsplanungsmaßnahmen. Diese sind jedoch vornehmlich auf den motorisierten und nicht-motorisierten Individualverkehr (MIV und NMIV) sowie den Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) ausgerichtet. Den Instrumentarien mit Fokus auf den Güterverkehr fehlt häufig die Validität und die nachgewiesene Allgemeingültigkeit. [5] Da ein reiner Infrastrukturausbau bedingt durch die begrenzte Flächenverfügbarkeit in Städten, mangelnder öffentlicher Akzeptanz sowie finanziellen Engpässen in der Kommunalverwaltung scheitert, rücken nichtinvestive, sogenannte weiche Verkehrs- und Logistikmaßnahmen in den Fokus der urbanen Güterverkehrsplanung und -politik. Diese Maßnahmen werden als City-Logistik oder Ballungsraumlogistik definiert. Im Folgenden wird übergeordnet der Begriff urbane Logistik verwendet.

Aufgrund dessen ist die Entwicklung eines grundlegenden Systemverständnisses zum urbanen KEP-Verkehr notwendig. Voraussetzung dafür ist, die Wechselbeziehungen zwischen den beteiligten Akteuren sowie deren Entscheidungs- und Transportprozesse auf urbaner Ebene aufzuzeigen. Basierend darauf gelingt die Identifizierung effizienter Lösungen in der Verkehrsplanung und in der urbanen Logistik zur nachhaltigen Regulierung der Güterverkehrsnachfrage, die in dieses System eingreifen.

In der Abbildung 4.4 wird die beschriebene Problemstellung aufgezeigt und die potentiellen Eingriffsmöglichkeiten seitens der Verkehrsplanung und der urbanen Logistik dargestellt.

5. Formalisierung des Kopplungsansatzes

Im folgenden Kapitel wird der übergeordnete Kopplungsansatz (siehe Kapitel 2) im Rahmen des Fallbeispiels zum KEP-Markt in urbanen Räumen formalisiert. Zunächst wird das entwickelte SD-Modell im Detail beschrieben (siehe Kapitel 5.1). Danach wird auf die Modellbildung der MVS eingegangen (siehe Kapitel 5.2). Abschließend werden die Funktionsweise sowie die Schnittstellen der Kopplung, Aggregation und Disaggregation, zum Fallbeispiel spezifiziert dargelegt (siehe Kapitel 5.3). In Abbildung 5.1 wird der Rückkopplungsansatz zwischen dem SD-Modell und der MVS aufgezeigt, der einen Datentransfer ausgewählter Parameter in beide Richtungen erlaubt.



Abbildung 5.1.: Formalisierung des Kopplungsansatzes zum Fallbeispiel KEP-Markt in urbanen Räumen.

5.1. SD-Modell

Im Folgenden wird die mathematische Formalisierung des SD-Ansatzes im Detail diskutiert. Die Formalisierung basiert auf der Literaturanalyse ausgewählter SD-Modelle (siehe Kapitel 3.1.4) und der Systembeschreibung mittels qualitativer Kausalkettendiagramme (siehe Thaller et al. [164]).

Die untersuchten SD-Ansätze (siehe Tabelle 3.1 in Kapitel 3.1.4) wurden an die Anforderungen des eigenen Forschungsansatzes angepasst und erweitert. Im Rahmen des Modellierungsverfahrens wurde auf die präzise und genaue Abbildung und den notwendigen Detaillierungsgrad hinsichtlich der Struktur- und Verhaltensgültigkeit des SD-Modells geachtet. Der vorliegende SD-Ansatz erlaubt dabei die Abbildung der Entwicklungen des Verhaltens und der Strukturen der untersuchten Akteurssysteme im Zeitverlauf. Zudem wurde dieses Modell an die Anforderungen der bestehenden Sekundärdatenbasen angepasst. Die verschiedenen Akteurssysteme wurden in kleinstmögliche Submodule differenziert, um die Nachvollziehbarkeit und Transparenz zu gewährleisten.

Zunächst werden die internen Strukturen der folgenden Submodule und deren Interdependenzen zueinander aufgezeigt.

- Bevölkerung
- KEP-Dienstleister
 - Güternachfrage privater und gewerblicher Kunden
 - Güterverkehrsnachfrage und -kapazität
 - Laufleistung und Kraftstoffverbrauch
 - Flottenbestand
 - Tourencharakteristika und Transportzeit
 - Transportkosten
- Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage

Die Veränderungen im Verhalten und die Entwicklung der relevanten Akteure in diesem System können mittels des vorliegenden SD-Ansatzes gezeigt werden. Bei der SD-Simulation wird das Zeitintervall auf 0,00273973 Jahre [a] definiert. Dies entspricht 1 von 365 Tagen im Jahr. Dies bedeutet, dass pro 0,00273973 a ein Wert im Rahmen der Zeitverlaufsprognose abgespeichert wird. Der definierte Zeitschritt wird zur möglichst genauen Approximation der Hochrechnung gewählt. Um eine übersichtliche Darstellung der Simulationsergebnisse zu erlauben sowie eine Kalibrierung mittels historischer Zeitreihenwerte durchführen zu können, werden die berechneten Werte eines ganzen Jahres herangezogen.

Nach der MVS-Simulation werden die Endergebnisse der Tagessimulation aufbereitet und an das SD-Modell zur Parametrisierung transferiert. Danach erfolgt mittels SD eine Zeitverlaufsprognose, die nach einem Zeitschritt — in diesem Fall nach einem Jahr — angehalten wird.

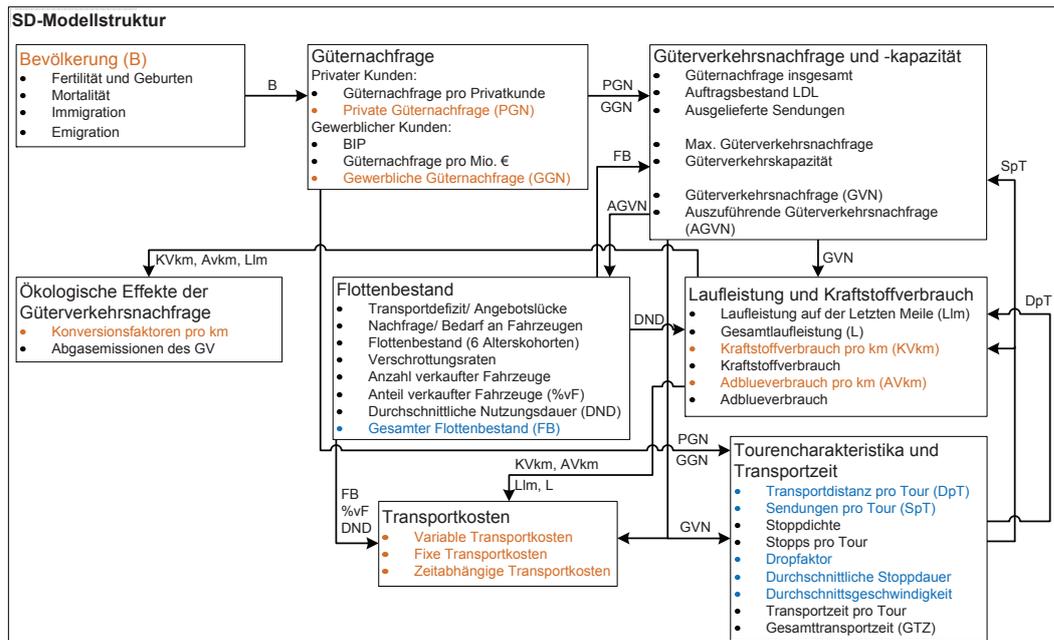


Abbildung 5.2.: SD-Modellstruktur (Eigene Darstellung nach [160]).

Die abgespeicherten Simulationsergebnisse des SD-Modells des letzten Zeitintervalls werden im Nachgang an die MVS zur Initialisierung und Fortschreibung der synthetischen Welt übergeben. Aufgrund dieses Vorgehens wurden Systemparameter identifiziert und in der entsprechenden Farbe markiert, die von der MVS zum SD-Modell (in blau) sowie vom SD-Modell zur MVS (in orange) weitergegeben werden. Auch im Text werden die zu transferierenden Systemparameter in den jeweiligen Farben hinterlegt.

In der Abbildung 5.2 wird die übergeordnete Struktur des SD-Modells dargestellt.

Für die Systemelemente dieses SD-Modells werden die in der Tabelle 5.1 aufgezeigten Formalisierungen für die jeweiligen Variablentypen gewählt.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Teilmodule des quantitativen SD-Ansatzes formalisiert.

5.1.1. Bevölkerung

Zunächst wird das Submodul *Bevölkerung* diskutiert. Dies beschreibt die soziodemographische Entwicklung der Population im Zeitverlauf. Es haben sich bereits mehrere SD-Ansätze mit der soziodemographischen Struktur der Bevölkerung auseinandergesetzt (z. B. Bossel [20], Engel [39], Han und Hayashi [65], Heimgartner [66], IWW [72], Jifeng et al. [73], Jin et al. [74], Kuchenbecker [91], Lee [93], Pfaffenbichler [117], Raux et al. [121, 122], Ruutu et al. [129], Schade et al. [131], Schade [132] sowie Zhan et al. [175]).

Dieses Submodul basiert auf dem Ansatz nach Bossel [20]. Die Gesamtbevölkerung B wird nach n Alterskohorten bzw. -gruppen i differenziert.

Tabelle 5.1.: Variablentypen.

Variablentypen	Formalisierung
Zustandsvariable	Z
Flussvariable	F
Hilfsvariable	h
Konstante (Rate)	ρ
Anteil	α
Faktor	β
Zeit	t
Zeitintervall	τ

Dabei wird jede Alterskohorte durch die soziodemographischen Prozesse *Immigration I*, *Emigration E*, *Mortalität M* und *Übergang zur nächsten Alterskohorte U* beeinflusst. In der Abbildung 5.3 werden diese beschriebenen Zusammenhänge als Flussdiagramm dargestellt.

Die betrachteten Untersuchungssubjekte sind die Privatkonsumenten der KEP-Dienstleister im System. Dementsprechend findet als Untersuchungseinheit Klienten [KI] für das folgende Submodul Verwendung.

Zunächst wird die Einteilung der Alterskohorten im SD-Modell im Vergleich zur MVS in der Tabelle 5.2 aufgezeigt.

Zur Berechnung der Hilfsvariablen *Anzahl der Geburten* g_i wird die Fertilitäts- bzw. Geburtenrate $\rho_{g,i}$ und die Zustandsvariable *Bevölkerung* B_i herangezogen. In diesem Fall werden die zehn Alterskohorten 2–11 berücksichtigt, da es in diesen Alterskohorten nach der Berliner Statistik zu Geburten kommt. [2] In der Gleichung (5.1) wird die Formalisierung der Geburten aufgezeigt.

$$g_i = \rho_{g,i} B_i \quad (5.1)$$

wobei

- g_i = Geburten je Alterskohorte [KI/a]
- $\rho_{g,i}$ = Fertilitätsrate je Alterskohorte [%/a]
- B_i = Anzahl der Bevölkerung je Alterskohorte [KI]

In der Gleichung (5.2) wird die Zuflussvariable *Geburten insgesamt* G berechnet, indem die Geburten g_i der jeweiligen Alterskohorten 2–11 akkumuliert werden. Nur die erste Alterskohorte B_1 nimmt dabei aufgrund von *Geburten* G zu.

$$G = \sum_{i=1}^n g_i \quad (5.2)$$

wobei

- G = Geburten insgesamt [KI/a]

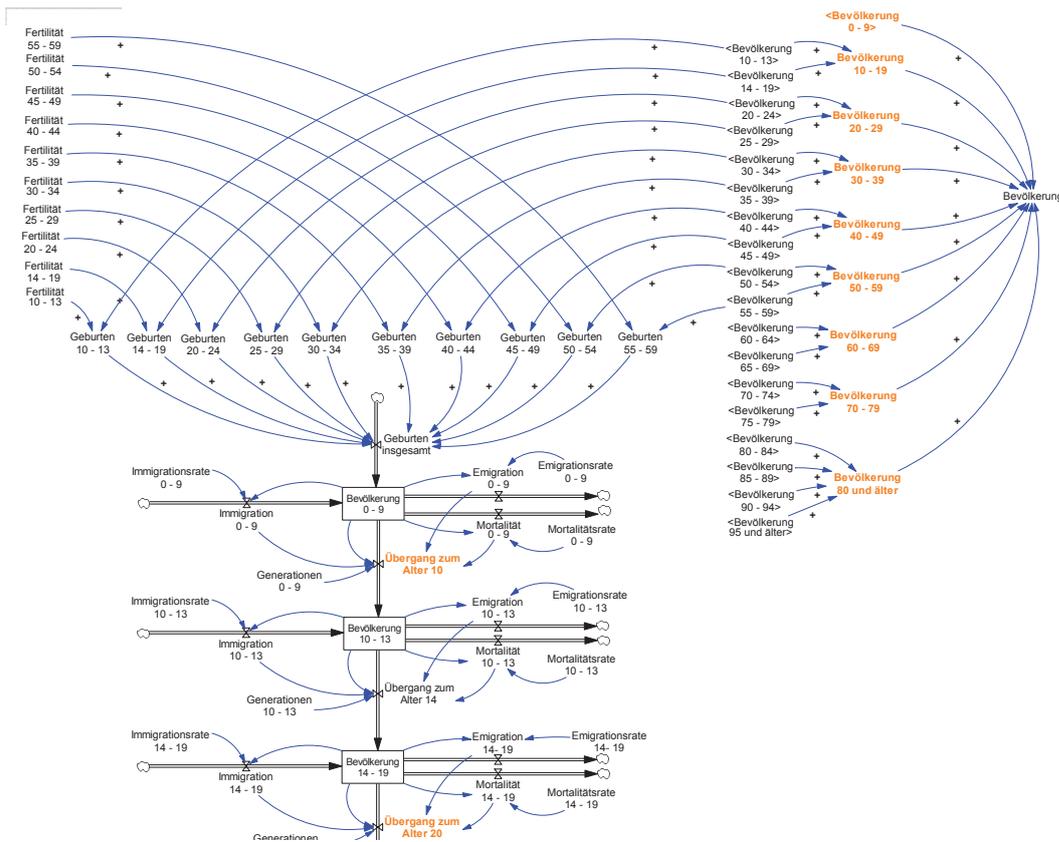


Abbildung 5.3.: Auszug des Flussdiagramms zur Bevölkerungsentwicklung (Eigene Darstellung nach [163]).

Nun folgt die Formalisierung der Flussvariablen *Mortalität* bzw. Anzahl der Sterbefälle je Alterskohorte M_i . Dabei werden die Alterskohorten 1–19 herangezogen.

$$M_i = \rho_{M,i} B_i \tag{5.3}$$

wobei

M_i = Mortalität je Alterskohorte [KI/a]

$\rho_{M,i}$ = Mortalitätsrate je Alterskohorte [%/a]

Tabelle 5.2.: Kohortenmodell zum Bevölkerungsmodell.

i	SD-Alterskohorten	MVS-Alterskohorten
1	0–9	0–9
2	10–13	
3	14–19	10–19
4	20–24	
5	25–29	20–29
6	30–34	
7	35–39	30–39
8	40–44	
9	45–49	40–49
10	50–54	
11	55–59	50–59
12	60–64	
13	65–69	60–69
14	70–74	
15	75–79	70–79
16	80–84	
17	85–89	
18	90–94	≥80
19	≥95	

Zur Berechnung der Flussvariablen *Immigration* bzw. Anzahl der Einwanderer je Alterskohorte I_i wird die Bevölkerung je Alterskohorte B_i und die jeweilige Immigrationsrate $\rho_{I,i}$ berücksichtigt. Diese Formalisierung gilt für die Alterskohorten 1–19.

$$I_i = \rho_{I,i} B_i \quad (5.4)$$

wobei

I_i = Immigration je Alterskohorte [Kl/a]
 $\rho_{I,i}$ = Immigrationsrate je Alterskohorte [%/a]

Im Folgenden wird auf die Berechnung der Flussvariablen *Emigration* bzw. Anzahl der Auswanderer je Alterskohorte E_i eingegangen. Diese Formalisierung findet für die Alterskohorten 1–19 Verwendung.

$$E_i = \rho_{E,i} B_i \quad (5.5)$$

wobei

E_i = Emigration je Alterskohorte [Kl/a]
 $\rho_{E,i}$ = Emigrationsrate je Alterskohorte [%/a]

Nun werden die Flussvariablen *Übergänge in die jeweils nächste Alterskohorte* U_i beschrieben. Dieser Übergang erfolgt bei den Alterskohorten 1–18.

$$U_i = \frac{\frac{B_i}{\tau} - E_i - M_i + I_i}{\frac{N_i}{\tau}} \quad (5.6)$$

wobei

U_i = Übergang in die nächste Alterskohorte [KI/a]

N_i = Anzahl der Generationen je Alterskohorte [a]

τ = Zeitintervall [a]

Die Formalisierung der Zustandsvariablen *Bevölkerung* B_1 der Alterskohorte 1 wird nun vorgenommen.

$$B_1(t) = \int_0^t [G(\tau) + I_1(\tau) - E_1(\tau) - M_1(\tau) - U_1(\tau)] \delta\tau + B_1(0) \quad (5.7)$$

Für die weiteren Alterskohorten 2–19 wird B_i folgendermaßen formalisiert.

$$B_i(t) = \int_0^t [I_i(\tau) + U_i(\tau) - E_i(\tau) - M_i(\tau) - U_{i+1}(\tau)] \delta\tau + B_i(0) \quad (5.8)$$

Zur Berechnung der Bevölkerung b_i der Alterskohorten, die zur Initialisierung der MVS herangezogen werden, werden die jeweiligen Zustandsvariablen B_i zu Hilfsvariablen akkumuliert. Damit leiten sich 9 Alterskohorten ab.

$$b_i = \sum_{i=1}^n B_i \quad (5.9)$$

wobei

b_i = Bevölkerung je Alterskohorte zur Initialisierung der MVS [KI]

Da zur Kalkulation der privaten Güternachfrage die Anzahl der Gesamtbevölkerung benötigt wird, werden im Folgenden die Hilfsvariablen b_i zur Gesamtbevölkerung b akkumuliert.

$$b = \sum_{i=1}^n b_i \quad (5.10)$$

wobei

b = Bevölkerung insgesamt [KI]

Der Ansatz erlaubt, Auswirkungen des demographischen Wandels und der zunehmenden Migration auf die Bevölkerungsentwicklung abzubilden. Die Bevölkerungsentwicklung wirkt dabei auf die Güternachfrage privater Kunden.

Nach jedem SD-Simulationslauf werden die Werte der Hilfsvariablen Bevölkerung der jeweiligen Alterskohorten b_i an die MVS zur Fortschreibung der Anzahl und der Altersstruktur der synthetischen Population weitergegeben.

5. Formalisierung des Kopplungsansatzes

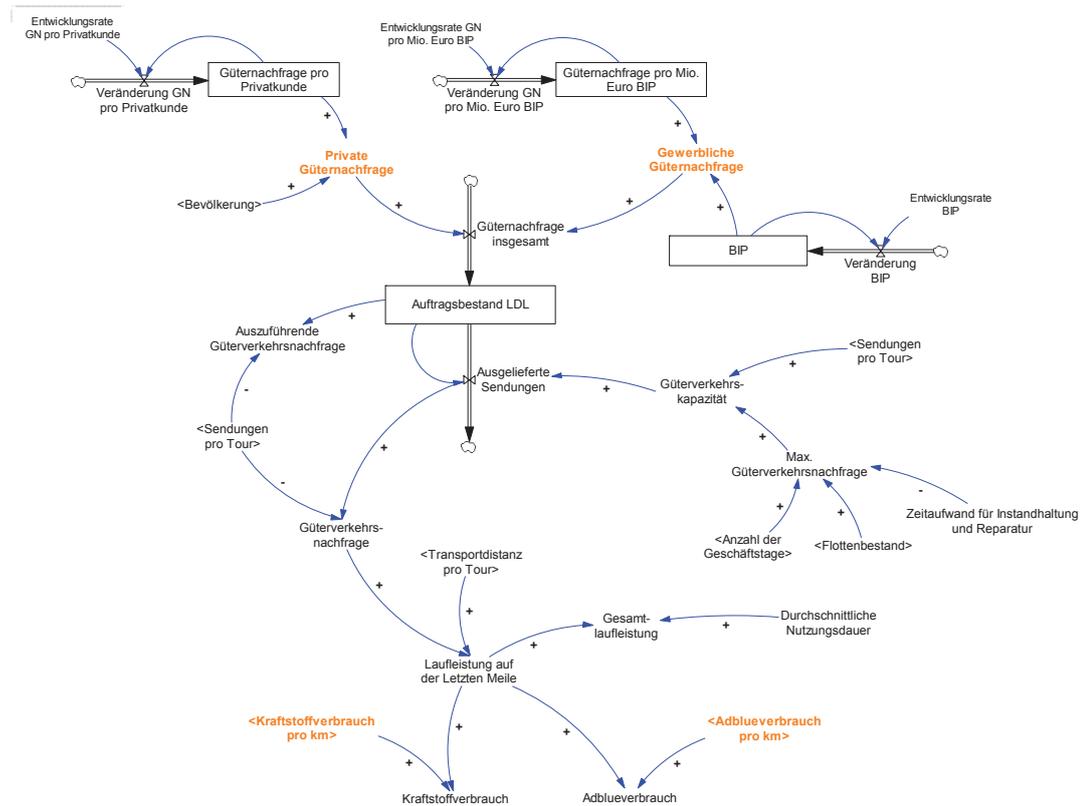


Abbildung 5.4.: Flussdiagramm zur Güternachfrage- und Güterverkehrsnachfrageentwicklung (Eigene Darstellung nach [163]).

5.1.2. KEP-Dienstleister

In diesem Abschnitt werden die Interdependenzen zwischen der Güternachfrage der privaten und gewerblichen Kunden der KEP-Dienstleister und die daraus resultierenden Auswirkungen auf den KEP-Verkehr im Detail aufgezeigt. Basierend darauf können Schlüsselvariablen, wie z. B. Laufleistung und Kraftstoffverbrauch, berechnet werden.

Im Folgenden werden die internen Strukturen und Abhängigkeiten zwischen Güternachfrage, Güterverkehrsnachfrage, Güterverkehrskapazität und Laufleistung auf der Letzten Meile sowie Kraftstoffverbrauch gezeigt und im Detail beschrieben. Das Flussdiagramm (siehe Abbildung 5.4) und die mathematischen Formalisierungen sind an die Arbeiten von Aschauer et al. [6], Bossel [20], IWW [72], Kaczmarek und Völker [77], Kuchenbecker [91], Kühn und Krail [92], Meyer Sanches et al. [107], Moder [109], Schade et al. [131], Schade [132], VDI [166], Villa et al. [168] sowie Weidmann et al. [170] angelehnt.

Güternachfrage privater und gewerblicher Kunden Dieses Submodul wurde auf Basis der Arbeiten von Bossel [20], Esser und Kurte [40, 41], IWW [72], Kaczmarek und Völker [77], Kuchenbecker [91], Schade et al. [131], Schade [132] sowie Villa et al. [168] entwickelt und an die eigenen Modellanforderungen angepasst.

Nach eigenen Annahmen ist die *Güternachfrage der Privatkunden* direkt von der Bevölkerungsentwicklung und der *Güternachfrage pro Privatkunde* abhängig. In jedem Zeitintervall wird die *Güternachfrage pro Privatkunde* durch die *Entwicklungsrate der Güternachfrage pro Privatkunde* verändert. Die *Güternachfrage pro Privatkunde* entspricht in diesem Kontext dem KEP-Index privater Personen nach Esser und Kurte [40, 41] und Manner-Romberg et al. [100]. Hierbei handelt es sich um die B2C- und C2C-Sendungen je Privatperson und Jahr.

Die Entwicklung der *gewerblichen Güternachfrage der Ökonomie* richtet sich nach dem privaten Konsum bzw. der privaten Güternachfrage. Diese Annahme wird jedoch im folgenden Ansatz nicht verfolgt. Im Gegensatz dazu wird die Annahme nach Esser und Kurte [40, 41] herangezogen, nach der die *gewerbliche Güternachfrage* von der Entwicklung des *Bruttoinlandsprodukts* (BIP) und der *Güternachfrage pro Million Euro BIP* abhängig ist. Dabei ist die gewerbliche Güternachfrage pro Million Euro BIP als KEP-Index der Unternehmen definiert. Nach eigenen Berechnungen weisen Esser und Kurte [40, 41] den KEP-Index Unternehmen bzw. die B2B-Sendungen pro Mio. Euro BIP pro Jahr seit 2009 aus.

Demzufolge wird im Rahmen des vorliegenden Fallbeispiels die Güternachfrage als die Nachfrage nach Paketen bzw. die Aufträge privater und gewerblicher Kunden der KEP-Dienstleister definiert. Die Privatkunden gehören dabei zu den B2C- und C2C-Segmenten, die gewerblichen Kunden dagegen zum B2B-Segment. Als Ladeeinheiten finden im Fallbeispiel zum KEP-Markt Paketeinheiten [PE] Verwendung.

Zunächst wird die Güternachfrage pro Privatkunde GNK_p formalisiert.

$$V_{GNK,p} = \rho_{GNK,p} GNK_p \quad (5.11)$$

wobei

$V_{GNK,p}$ = Veränderung der Güternachfrage pro Privatkunde [(PE/KI)/a]

$\rho_{GNK,p}$ = Entwicklungsrate der Güternachfrage pro Privatkunde [%/a]

GNK_p = Güternachfrage pro Privatkunde [PE/KI]

$$GNK_p(t) = \int_0^t [V_{GNK,p}(\tau)] \delta\tau + GNK_p(0) \quad (5.12)$$

Nun wird die Hilfsgröße *Güternachfrage* für alle Privatkunden gn_p abgeleitet. Die Entwicklung dieser Hilfsgröße steht in Abhängigkeit zur Bevölkerungsentwicklung b .

$$gn_p = GNK_p \frac{b}{\tau} \quad (5.13)$$

wobei

gn_p = Private Güternachfrage [PE/a]

Wie bereits erwähnt wurde, ist die *gewerbliche Güternachfrage* gn_o von der Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts BIP abhängig. Dazu ist es zunächst notwendig, die Entwicklung des BIP über die Zeit zu berechnen.

$$V_{BIP} = \rho_{BIP} BIP \quad (5.14)$$

wobei

V_{BIP} = Veränderung des BIP [Mio. € BIP/a]

ρ_{BIP} = Entwicklungsrate des BIP [%/a]

BIP = Bruttoinlandsprodukt [Mio. € BIP]

$$BIP(t) = \int_0^t [V_{BIP}(\tau)] \delta\tau + BIP(0) \quad (5.15)$$

$$V_{GNK,o} = \rho_{GNK,o} GNK_o \quad (5.16)$$

wobei

$V_{GNK,o}$ = Veränderung der Güternachfrage pro Mio. € BIP [(PE/Mio. € BIP)/a]

$\rho_{GNK,o}$ = Entwicklungsrate der Güternachfrage pro Mio. € BIP [%/a]

GNK_o = Güternachfrage pro Mio. € BIP [PE/Mio. € BIP]

$$GNK_o(t) = \int_0^t [V_{GNK,o}(\tau)] \delta\tau + GNK_o(0) \quad (5.17)$$

$$gn_o = GNK_o \frac{BIP}{\tau} \quad (5.18)$$

wobei

gn_o = Gewerbliche Güternachfrage [PE/a]

Nach jedem SD-Simulationslauf werden die Werte der Hilfsvariablen *private Güternachfrage* gn_p und *gewerbliche Güternachfrage* gn_o an die MVS zur Verteilung dieser an die synthetische Population transferiert. Damit wird die initiale Güternachfrage der KEP-Kunden bestimmt, die über einen Auftrag an den KEP-Dienstleister erfolgt. Dementsprechend hat der KEP-Dienstleister einen Überblick über seinen gesamten Auftragsbestand bzw. die Güternachfrage seiner Kunden.

Güterverkehrsnachfrage und -kapazität Aufbauend auf Aschauer et al. [6], Kaczmarek und Völker [77], Kuchenbecker [91], Meyer Sanches et al. [107], Moder [109], VDI [166], Villa et al. [168] sowie Weidmann et al. [170] wurde das folgende Submodul entwickelt und an die Anforderungen des betrachteten Systems angepasst. In diesem Submodul liegt der Fokus auf dem Auftragsbestand des LDL, in diesem Fall des KEP-Dienstleisters, in Abhängigkeit der Güterverkehrskapazität. Basierend darauf kann der

verkehrsrelevante Schlüsselwert Güterverkehrsnachfrage bzw. die Anzahl der durchgeführten Fahrten abgeleitet werden.

Die Flussvariable *Güternachfrage insgesamt* bzw. Gesamtbestellungen GN umfasst die *Güternachfrage der privaten* gn_p sowie der gewerblichen Kunden gn_o des KEP-Dienstleisters.

$$GN = gn_p + gn_o \quad (5.19)$$

wobei

GN = Güternachfrage insgesamt [PE/a]

Der *Auftragsbestand* A des KEP-Dienstleisters wird aus dem Zusammenhang der *Gesamtgüternachfrage* GN und den *ausgelieferten Sendungen* S pro Zeitintervall bestimmt.

$$A(t) = \int_0^t [GN(\tau) - S(\tau)] \delta\tau + A(0) \quad (5.20)$$

wobei

A = Auftragsbestand des LDL [PE]

S = Ausgelieferte Sendungen [PE/a]

In diesem Fall sind die *ausgelieferten Sendungen* S pro Zeitintervall vom *Auftragsbestand* A und der *Güterverkehrskapazität* k_{GV} je Zeitintervall abhängig. Aufgrund dessen werden folgende Szenarien diskutiert.

1. Falls mehr Sendungen transportiert werden sollen als die *Güterverkehrskapazität* k_{GV} zulässt, wird nur die maximal mögliche Anzahl an Sendungen entsprechend der *Güterverkehrskapazität* k_{GV} ausgeliefert. Die restlichen Sendungen verbleiben in diesem Zeitintervall im Auftragsbestand A und finden erst im nächsten Zeitintervall bei der Auslieferung Berücksichtigung.
2. Aufgrund der bestehenden *Güterverkehrskapazität* k_{GV} können mehr Sendungen transportiert werden als notwendig. Der gesamte *Auftragsbestand* A kann in dieser Zeitperiode ausgeliefert werden.

$$S = \begin{cases} \frac{A}{\tau} & , \frac{A}{\tau} < k_{GV} \\ k_{GV} & \end{cases} \quad (5.21)$$

wobei

k_{GV} = Güterverkehrskapazität [PE/a]

5. Formalisierung des Kopplungsansatzes

Die *Güterverkehrskapazität* k_{GV} ergibt sich aus dem Zusammenhang zwischen der Anzahl der *Sendungen pro Tour* s_T und der *maximal möglichen Güterverkehrsnachfrage* gvn_{max} . Die Touren werden mittels der Untersuchungseinheit Fahrten [F] angegeben.

$$k_{GV} = s_T gvn_{max} \quad (5.22)$$

wobei

$$\begin{aligned} s_T &= \text{Sendungen pro Tour [PE/F]} \\ gvn_{max} &= \text{Maximal mögliche Güterverkehrsnachfrage [F/a]} \end{aligned}$$

Die *maximal mögliche Güterverkehrsnachfrage* gvn_{max} ist vom bestehenden *Flottenbestand* fb , der Anzahl der *Geschäftstage* n_{GT} innerhalb eines Jahres (beinhaltet Werkstage inklusive Samstage) und dem *Zeitaufwand für Instandhaltung und Reparatur* t_{IR} der Fahrzeuge abhängig. Hierbei finden Tage als Untersuchungseinheit Verwendung, die mit der Kurzform d angegeben werden.

$$gvn_{max} = fb (n_{GT} - t_{IR}) \quad (5.23)$$

wobei

$$\begin{aligned} fb &= \text{Flottenbestand [F]} \\ n_{GT} &= \text{Anzahl der Geschäftstage pro Jahr [d/a]} \\ t_{IR} &= \text{Zeitaufwand für Instandhaltung und Reparatur [d/a]} \end{aligned}$$

Die *Güterverkehrsnachfrage* gvn bzw. das *Fahrtenaufkommen* pro Zeitintervall wird aus dem Verhältnis der *ausgelieferten Sendungen* S zu den *Sendungen pro Tour* s_T berechnet.

$$gvn = \frac{S}{s_T} \quad (5.24)$$

wobei

$$gvn = \text{Güterverkehrsnachfrage [F/a]}$$

Zusätzlich resultiert die *auszuführende Güterverkehrsnachfrage* gvn_a aus dem Quotienten des *Auftragsbestandes* A und der *Sendungen pro Tour* s_T für jedes Zeitintervall.

$$gvn_a = \frac{A}{s_T} \quad (5.25)$$

wobei

$$gvn_a = \text{Auszuführende Güterverkehrsnachfrage [F/a]}$$

Im Gegensatz zu der *maximal möglichen Güterverkehrsnachfrage* gvn_{max} , die entsprechend vom *Flottenbestand* fb abhängig ist, stellt die *auszuführende Güterverkehrsnachfrage* gvn_a die Fahrten dar, die zur Erfüllung des *Auftragsbestandes* A notwendig

sind. Diese Variable bestimmt das *Transportdefizit bzw. die Angebotslücke* des KEP-Dienstleisters fb_{TD} (vgl. *Submodul Flottenbestand*).

Für die Modellierung wird angenommen, dass ein LKW bzw. ein LKW-Fahrer innerhalb eines Tages eine Tour bzw. eine Fahrt ausführt. (siehe Abbildung 5.4)

Dieses Submodul wirkt auf die weiteren Teilmodule *Flottenbestand*, *Laufleistung und Kraftstoffverbrauch*, *Tourencharakteristika und Transportzeit* sowie *Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage*.

Laufleistung und Kraftstoffverbrauch Das folgende Submodul wird basierend auf den Annahmen von Aschauer et al. [6], Kühn und Krail [92], Meyer Sanches et al. [107] sowie Weidmann et al. [170] mathematisch formalisiert.

In Abhängigkeit der *Güterverkehrsnachfrage* gvn und der *Transportdistanz pro Tour* d_T wird die straßengebundene *Laufleistung auf der Letzten Meile* l_{LM} pro Zeitintervall abgeleitet. Diese Hilfsgröße zeigt die ausgeführten Kilometer auf der Straße für die Letzte Meile-Distribution auf.

$$l_{LM} = gvn \cdot d_T \quad (5.26)$$

wobei

l_{LM} = Laufleistung auf der Letzten Meile [km/a]
 d_T = Transportdistanz pro Tour [km/F]

Zusätzlich wird der Schlüsselwert *Gesamtlaufleistung* l in Abhängigkeit der *durchschnittlichen Nutzungsdauer* t_{ND} der Fahrzeuge und der *Laufleistung auf der Letzten Meile* l_{LM} bestimmt.

$$l = l_{LM} \cdot t_{ND} \quad (5.27)$$

wobei

l = Gesamtlaufleistung [km]
 t_{ND} = Durchschnittliche Nutzungsdauer [a]

Um den *Kraftstoffverbrauch* kv und den *Adblueverbrauch* av abzuleiten, ist zunächst die Berechnung des *Verbrauchs je km* der jeweiligen Emissionsklassen j notwendig. Bisher gibt es insgesamt sechs Emissionsklassen nach der Euronorm, die in der Tabelle 5.3 aufgeführt werden. Die Euronorm wurde in der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 vom Europäischen Parlament und vom Europäischen Rat im Jahr 2007 veröffentlicht und wird seitdem in regelmäßigen Abständen fortgeschrieben. [42]

Der Kraftstoffverbrauch pro km kv_{km} der jeweiligen Emissionsklassen j ist dabei von der LKW-Auslastung u sowie vom Kraftstoffverbrauch pro km in vollem $kv_{km,leer}$ und leerem Zustand $kv_{km,voll}$ abhängig. Dazu werden die Formalisierungen von der Verkehrsrundschau zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs herangezogen [89]. Zunächst wird die Ableitung der LKW-Auslastung aufgezeigt.

5. Formalisierung des Kopplungsansatzes

Tabelle 5.3.: Emissionsklassen nach [42].

j	1	2	3	4	5	6
Emissionsklassen	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4	EURO 5	EURO 6

$$nl_{LKW} = s_T w_S \quad (5.28)$$

wobei

nl_{LKW} = Tatsächliche Nutzlast pro LKW [kg/F]
 w_S = Gewicht pro Sendung [kg/PE]

$$u = \frac{0,5 nl_{LKW}}{nl_{max}} \quad (5.29)$$

wobei

u = LKW-Auslastung [%]
 nl_{max} = Maximale Nutzlast pro LKW [kg/F]

Die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs pro km kv_{km} der jeweiligen Emissionsklassen j wird im Folgenden formalisiert.

$$kv_{km,j} = kv_{km,leer,j} + (u (kv_{km,voll,j} - kv_{km,leer,j})) \quad (5.30)$$

wobei

$kv_{km,j}$ = Kraftstoffverbrauch pro Kilometer der Emissionsklasse j [l/km]
 $kv_{km,leer,j}$ = Kraftstoffverbrauch LKW leer pro Kilometer der Emissionsklasse j [l/km]
 $kv_{km,voll,j}$ = Kraftstoffverbrauch LKW voll pro Kilometer der Emissionsklasse j [l/km]

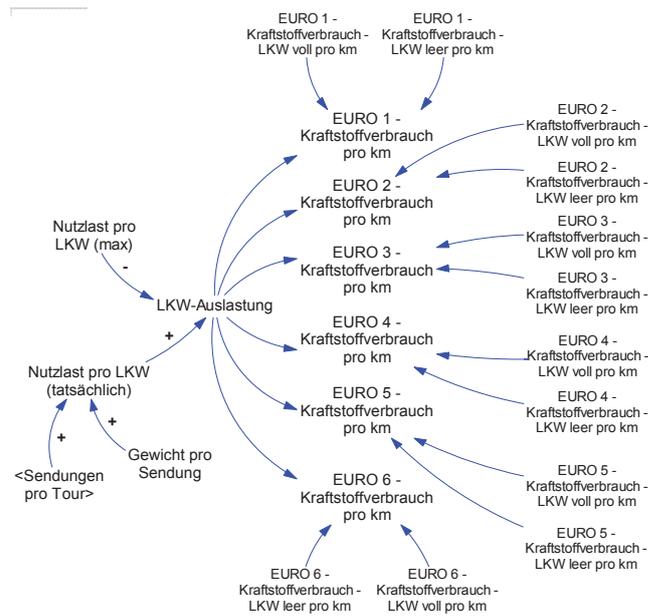
Um den mittleren Kraftstoffverbrauch pro km \bar{kv}_{km} zu ermitteln, werden $kv_{km,j}$ und die jeweiligen Anteile der Fahrzeugbestände je Emissionsklasse $\alpha_{fb,j}$ hinzugezogen. Neben \bar{kv}_{km} für dieselbetriebene LKW wird auch der mittlere Adblueverbrauch pro km \bar{av}_{km} in derselben Weise berechnet. Beim Adblueverbrauch werden jedoch nur die Emissionsklassen EURO 5 und 6 berücksichtigt.

$$\bar{kv}_{km} = \sum_{i=1}^n \alpha_{fb,j} kv_{km,j} \quad (5.31)$$

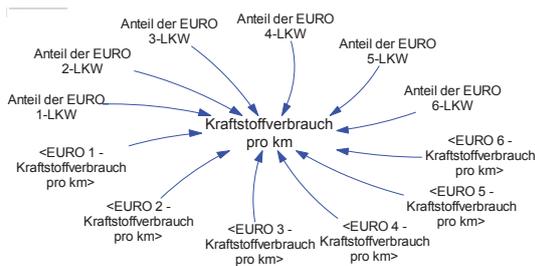
wobei

\bar{kv}_{km} = Mittlerer Kraftstoffverbrauch pro Kilometer [l/km]
 $\alpha_{fb,j}$ = Anteil der Fahrzeugbestände je Emissionsklasse j [%]

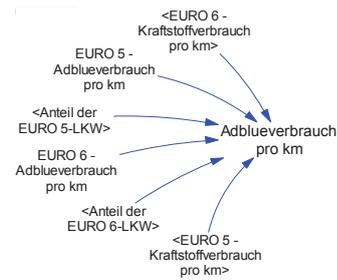
In der Abbildung 5.5 werden die zuvor formalisierten Zusammenhänge in Flussdiagrammen aufgezeigt.



(a) Kraftstoffverbrauch nach Emissionsklassen.



(b) Kraftstoffverbrauch pro km.



(c) Adblueverbrauch pro km.

Abbildung 5.5.: Berechnung des Kraftstoffverbrauchs (Eigene Darstellung nach [163]).

Ferner wird der *Kraftstoffverbrauch* kv basierend auf der *Laufleistung auf der Letzten Meile* l_{LM} und dem *Kraftstoffverbrauch pro km* $\bar{k}v_{km}$ abgeleitet. Die Formalisierung gilt auch zur Berechnung des Adblueverbrauchs av .

$$kv = l_{LM} \bar{k}v_{km} \tag{5.32}$$

wobei

kv = Kraftstoffverbrauch [l/a]

Dieses Submodul wirkt direkt auf die Entwicklung der Transportkosten und die ökologischen Auswirkungen der Güterverkehrsnachfrage.

5. Formalisierung des Kopplungsansatzes

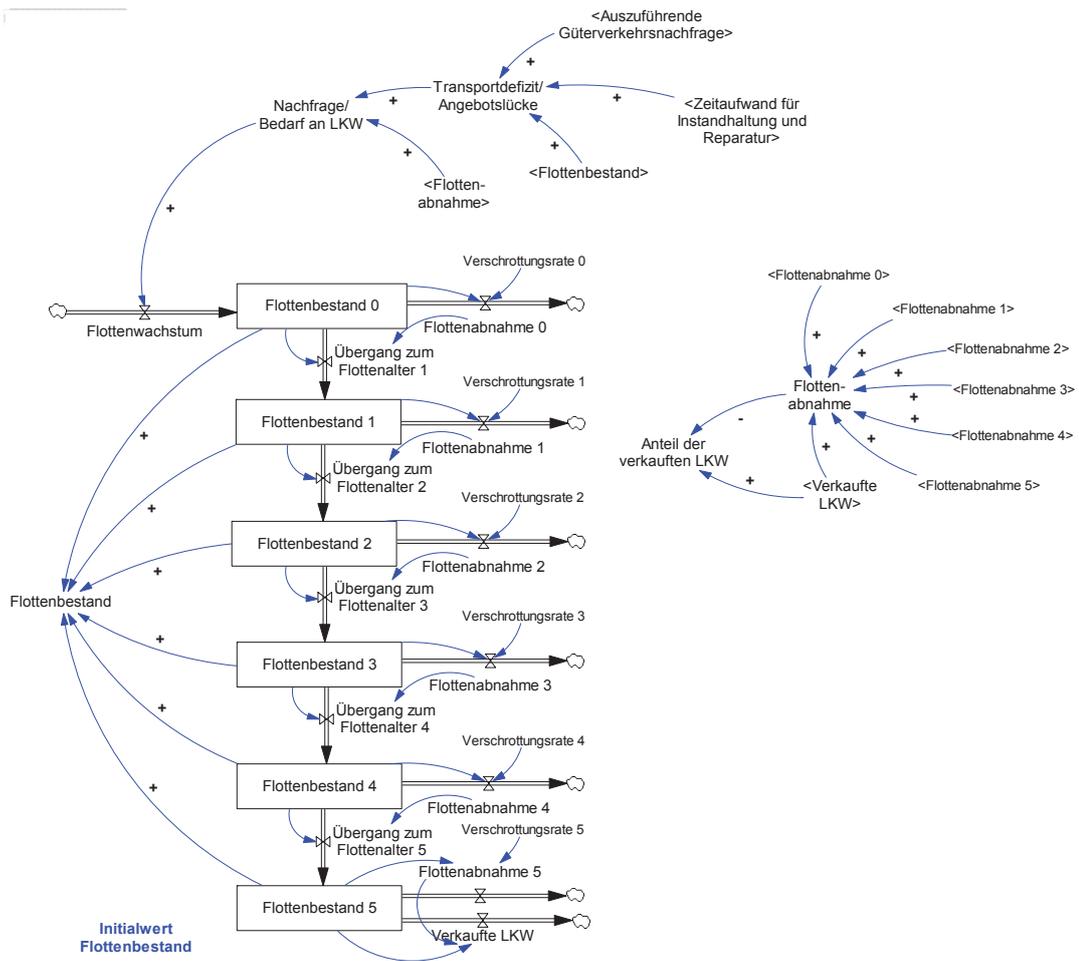


Abbildung 5.6.: Flussdiagramm zur Flottenbestandsentwicklung (Eigene Darstellung nach [163]).

Die Hilfsvariablen *Kraftstoffverbrauch pro km* $\bar{k}v_{km}$ und *Adblueverbrauch pro km* $\bar{a}v_{km}$ werden vom SD-Modell zur MVS transferiert, um die Verbrauchswerte der Fahrzeuge zu aktualisieren.

Flottenbestand Basierend auf den mathematischen Formalisierungen und Annahmen von Kuchenbecker [91], Kühn und Krail [92], Meyer Sanches et al. [107], VDI [166] und Weidmann et al. [170] wird das folgende Submodul entwickelt. Dieses Submodul wird durch die Entwicklung der *Güterverkehrsnachfrage* beeinflusst (siehe Abbildung 5.6).

Der *Flottenbestand* der KEP-Dienstleister ist in n Alterskohorten q aufgrund der *durchschnittlichen Nutzungsdauer* t_{ND} und der gesetzlichen Abschreibungsdauer dieser Fahrzeuge unterteilt.

Tabelle 5.4.: Kohortenmodell zum Flottenbestandsmodul.

q	1	2	3	4	5	6
Alterskohorten	0	1	2	3	4	5

Zunächst wird die gewählte Einteilung der Kohorten zur Entwicklung des Flottenbestands in der Tabelle 5.4 präsentiert.

Das *Transportdefizit bzw. die Angebotslücke* fb_{TD} wird aus dem Zusammenhang zwischen der *auszuführenden Güterverkehrsnachfrage* gvn_a und dem *gesamten Flottenbestand* fb pro Zeitintervall abgeleitet.

$$fb_{TD} = \frac{gvn_a}{n_{GT} - t_{IR}} - \frac{fb}{\tau} \quad (5.33)$$

wobei

fb_{TD} = Transportdefizit bzw. Angebotslücke [F/a]

Die *Nachfrage nach bzw. der Bedarf an Fahrzeugen* fb_N resultiert aus der *Flottenabnahme* r_{fb} und dem *Transportdefizit bzw. der Angebotslücke* fb_{TD} des KEP-Dienstleisters.

$$fb_N = fb_{TD} + r_{fb} \quad (5.34)$$

wobei

fb_N = Nachfrage bzw. Bedarf an Fahrzeugen [F/a]

r_{fb} = Flottenabnahme insgesamt [F/a]

Der *Flottenbestand* FB der Alterskohorte 1 wird pro Zeitintervall durch das *Flottenwachstum* W_{FB} und die *Flottenabnahme* $R_{FB,1}$, die von der *Verschrottungsrate* $\rho_{s,1}$ abhängig ist, angepasst. Ein positives *Flottenwachstum* W_{FB} wird durch die *Nachfrage nach bzw. den Bedarf an Fahrzeugen* fb_N beeinflusst. Sobald diese Nachfrage größer als 0 ist, wächst die Flotte. Ein Negativwachstum ist hierbei nicht möglich.

$$W_{FB} = \begin{cases} fb_N, & fb_N \geq 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (5.35)$$

wobei

W_{FB} = Flottenwachstum [F/a]

$$R_{FB,q} = \rho_{s,q} FB_q \quad (5.36)$$

wobei

$R_{FB,q}$ = Flottenabnahme der jeweiligen Flottenkohorte q [F/a]

$\rho_{s,q}$ = Verschrottungsrate der jeweiligen Flottenkohorte q [%/a]

FB_q = Flottenbestand der jeweiligen Flottenkohorte q [F]

$$FB_1(t) = \int_0^t [W_{FB}(\tau) - R_{FB,1}(\tau) - U_{FB,1}(\tau)] \delta\tau + FB_1(0) \quad (5.37)$$

wobei

$U_{FB,1}$ = Übergang zum Flottenalter 1 [F/a]

Die Alterskohorten des *Flottenbestands* 2-6 verändern sich aufgrund des *Übergangs* $U_{FB,q}$ zur nächsten Alterskohorte und der *Flottenabnahme* $R_{FB,q}$ je Alterskohorte.

$$FB_q(t) = \int_0^t [U_{FB,q}(\tau) - R_{FB,q}(\tau) - U_{FB,q+1}(\tau)] \delta\tau + FB_q(0) \quad (5.38)$$

Die Initialwerte der Flottenbestände der Kohorten 1-6 wird als Quotient aus dem Initialwert des gesamten Flottenbestands FB_I und der Anzahl der Kohorten q , in diesem Fall 6, berechnet.

Die Flottenkohorte 6 schrumpft neben der Flottenabnahme durch Verschrottung $R_{FB,6}$ auch bedingt durch die verkauften LKW R_{VL} .

$$R_{VL} = \frac{FB_6}{\tau} - R_{FB,6} \quad (5.39)$$

wobei

R_{VL} = Verkaufte LKW [F/a]

Der Gesamtflottenbestand fb ergibt sich aus der Summe der Flottenkohorten 1-6.

$$fb = \sum_{i=1}^n FB_q \quad (5.40)$$

Die Gesamtflottenabnahme r_{fb} wird im Folgenden abgeleitet.

$$r_{fb} = \sum_{i=1}^n R_{FB,q} + R_{VL} \quad (5.41)$$

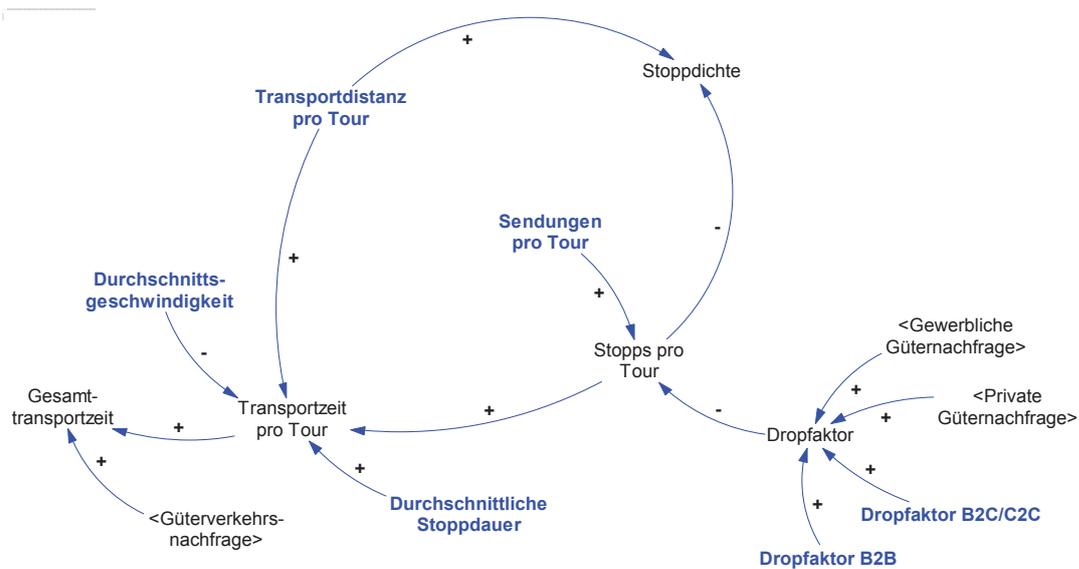


Abbildung 5.7.: Flussdiagramm zur Transportzeitentwicklung (Eigene Darstellung nach [163]).

Zur Berechnung des Anteils der verkauften LKW α_{VL} wird die Gesamtflottenabnahme r_{fb} und die absolute Anzahl der verkauften LKW R_{VL} herangezogen.

$$\alpha_{VL} = \frac{R_{VL}}{r_{fb}} \quad (5.42)$$

wobei

α_{VL} = Anteil der verkauften LKW [%]

In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf leichten Nutzfahrzeugen (3,5 t zul. GG.), die von den KEP-Dienstleistern vornehmlich für den Distributionsverkehr auf der Letzten Meile eingesetzt werden. Aus diesem Grund werden nur diese LKW-Typen im Basisszenario berücksichtigt.

Dieses Submodul wirkt auf die Entwicklung der *Güterverkehrsnachfrage* und der *-kapazität* sowie der *Transportkosten*.

Nach jedem MVS-Simulationslauf wird der berechnete Wert zu den durchgeführten Touren pro Tag an das SD-Modell zurückgegeben, um den initialen Flottenbestand FB_I vor der nächsten Prognose anzupassen.

Tourencharakteristika und Transportzeit In diesem Abschnitt wird die Formalisierung des Submoduls *Tourencharakteristika und Transportzeit*, das von der Entwicklung der *Güternachfrage* und der *Güterverkehrsnachfrage* abhängig ist, diskutiert. Dieses Submodul basiert auf dem Ansatz von Moder [109]. (siehe Abbildung 5.7)

5. Formalisierung des Kopplungsansatzes

Die Anzahl der *Stops pro Tour* st_T wird aus dem Verhältnis aus der Anzahl der *Sendungen pro Tour* s_T zum *Dropfaktor* β abgeleitet. Der Dropfaktor ist definiert als die Anzahl der ausgelieferten Pakete pro Stopp. In diesem Fall wird zwischen dem *Dropfaktor des B2C- und C2C-Segments* β_p sowie dem *des B2B-Segments* β_o unterschieden.

$$\beta = \frac{\beta_p gn_p}{GN} + \frac{\beta_o gn_o}{GN} \quad (5.43)$$

wobei

β = Dropfaktor [PE/St]
 β_p = Dropfaktor B2C/C2C [PE/St]
 β_o = Dropfaktor B2B [PE/St]

$$st_T = \frac{s_T}{\beta} \quad (5.44)$$

wobei

st_T = Stopps pro Tour [St/F]

Die *durchschnittliche Distanz zwischen Stopps (Stoppdichte)* d_{st} resultiert aus dem Zusammenhang zwischen der *Transportdistanz pro Tour* d_T und der Anzahl der *Stopps pro Tour* st_T .

$$d_{st} = \frac{d_T}{st_T} \quad (5.45)$$

wobei

d_{st} = Stoppdichte [km/St]

Die *Transportzeit pro Tour* t_T wird in Abhängigkeit der *Transportdistanz pro Tour* d_T , der Anzahl der *Stopps pro Tour* st_T , der *Durchschnittsgeschwindigkeit* \bar{v} und der *durchschnittlichen Stoppdauer* \bar{t}_{st} abgeleitet.

$$t_T = \frac{d_T}{\bar{v}} + st_T \bar{t}_{st} \quad (5.46)$$

wobei

t_T = Transportzeit pro Tour [h/F]
 \bar{v} = Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h]
 \bar{t}_{st} = Durchschnittliche Stoppdauer [h/St]

Die *Gesamttransportzeit* t_{GT} pro beobachteten Zeitintervall resultiert aus dem Zusammenhang zwischen der *Güterverkehrsnachfrage* gvn und der *Transportzeit pro Tour* t_T .

$$t_{GT} = gvn \cdot t_T \quad (5.47)$$

wobei

t_{GT} = Gesamttransportzeit [h/a]

Dieses Submodul wirkt auf die Entwicklung der *Güterverkehrskapazität*, der *Güterverkehrsnachfrage*, der *Laufleistung* und der *Transportkosten*.

Die folgenden Konstanten, die durch den Verkehr beeinflusst werden und räumlich abhängig sind, werden pro Zeitintervall durch die aggregierten Simulationsergebnisse der MVS angepasst.

- Dropfaktor B2B β_o
- Dropfaktor B2C und C2C β_p
- Transportdistanz pro Tour d_T
- Sendungen pro Tour s_T
- Durchschnittliche Stoppdauer \bar{t}_{st}
- Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v}

Transportkosten Im Folgenden wird das Submodul *Transportkosten* formalisiert, mit dessen Schlüsselvariablen die Abschätzung der Transportkosten des KEP-Dienstleisters auf der Letzten Meile im Zeitverlauf vorgenommen werden kann. In diesem Fall erfolgt die Gesamtkostenkalkulation für die genutzten, leichten Nutzfahrzeuge mit einem zul. GG. von 3,5 t. Die Kalkulation basiert auf den Formalisierungen nach Aschauer et al. [6], VDI [166] und Wittenbrink [172, 173] und kann zur Berechnung der Transportkosten für verschiedene LKW-Typen herangezogen werden.

Die *Gesamttransportkosten* c des KEP-Dienstleisters können in *variable* c_L , d. h. laufleistungsabhängige, zeitlich abhängige c_Z und fixe Transportkosten c_F differenziert werden.

Variable Transportkosten c_L werden durch die *Laufleistung*, den *Kraftstoffverbrauch*, die *Güterverkehrsnachfrage* und die Entwicklung des *Flottenbestands* beeinflusst. Die Abbildung 5.8 zeigt das Flussdiagramm mit den Kostenbestandteilen und deren Wirkungszusammenhängen der variablen Kosten.

5. Formalisierung des Kopplungsansatzes

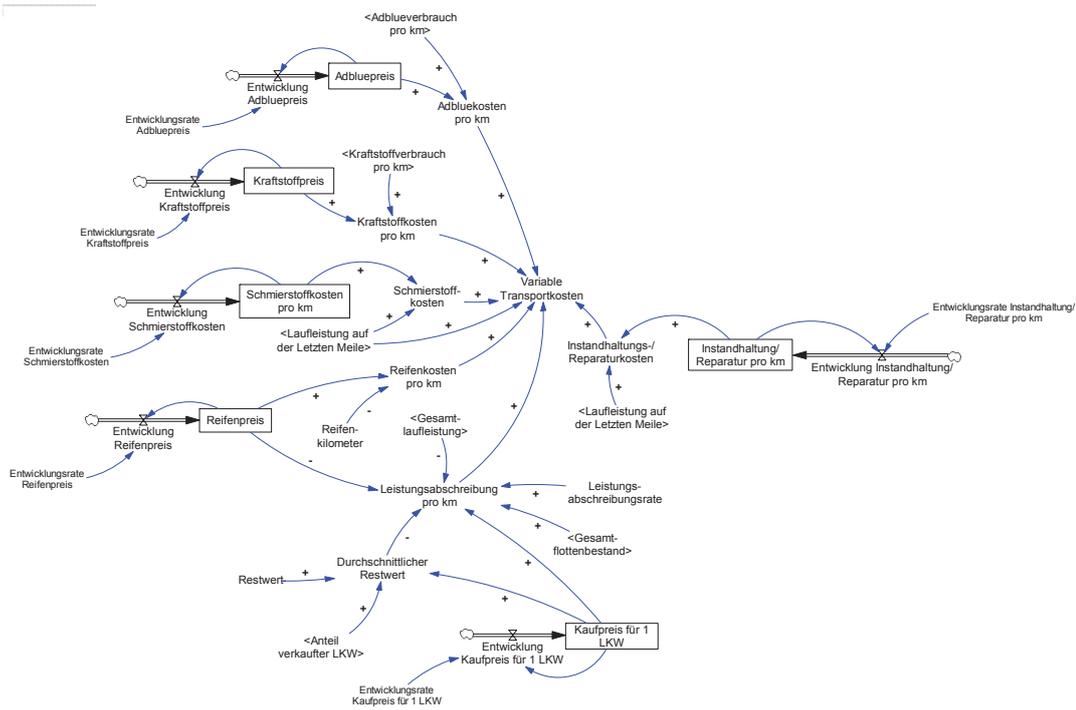


Abbildung 5.8.: Flussdiagramm zur Entwicklung der variablen Transportkosten (Eigene Darstellung nach [163]).

Die Kraftstoffkosten c_K , die von der Entwicklung des Kraftstoffpreises KP und des Kraftstoffverbrauchs $\bar{k}v_{km}$ der Fahrzeuge abhängen, werden folgendermaßen berechnet. Die folgenden Formalisierungen gelten auch für die Adbluekosten c_{AB} .

$$V_{KP} = \rho_{KP} KP \quad (5.48)$$

wobei

$$\begin{aligned} V_{KP} &= \text{Kraftstoffpreisentwicklung } [€/l \cdot a] \\ \rho_{KP} &= \text{Entwicklungsrate Kraftstoffpreis } [%/a] \\ KP &= \text{Kraftstoffpreis } [€/l] \end{aligned}$$

$$KP(t) = \int_0^t [V_{KP}(\tau)] \delta\tau + KP(0) \quad (5.49)$$

$$c_K = KP \bar{k}v_{km} \quad (5.50)$$

wobei

$$c_K = \text{Kraftstoffkosten pro km } [€/km]$$

Die *Schmierstoffkosten* c_{SC} werden durch die *Laufleistung auf der Letzten Meile* l_{LM} beeinflusst.

$$V_{SC} = \rho_{SC} SC \quad (5.51)$$

wobei

V_{SC} = Schmierstoffkostenentwicklung [€/((km*a)]
 ρ_{SC} = Entwicklungsrate Schmierstoffkosten [%/a]
 SC = Schmierstoffkosten pro km [€/km]

$$SC(t) = \int_0^t [V_{SC}(\tau)] \delta\tau + SC(0) \quad (5.52)$$

$$c_{SC} = SC l_{LM} \quad (5.53)$$

wobei

c_{SC} = Schmierstoffkosten pro Jahr [€/a]

Die *Reifenkosten* c_R können durch den Einfluss der *maximalen Reifenkilometer* R_{km} und der *Reifenpreise* RP variieren.

$$V_{RP} = \rho_{RP} RP \quad (5.54)$$

wobei

V_{RP} = Reifenpreisentwicklung [€/a]
 ρ_{RP} = Entwicklungsrate Reifenpreis [%/a]
 RP = Reifenpreis [€]

$$RP(t) = \int_0^t [V_{RP}(\tau)] \delta\tau + RP(0) \quad (5.55)$$

$$c_R = \frac{RP}{R_{km}} \quad (5.56)$$

wobei

c_R = Reifenkosten pro km [€/km]
 R_{km} = Reifenkilometer [km]

5. Formalisierung des Kopplungsansatzes

Die *Leistungsabschreibung* c_{LA} ist von der Entwicklung der *Reifenpreise* RP , des durchschnittlichen *Restwerts* $r\bar{w}$, des *Gesamtflottenbestands* fb , der *Gesamtlauflistung* l und des *Kaufpreises* LP für neue Fahrzeuge abhängig.

$$V_{LP} = \rho_{LP} LP \quad (5.57)$$

wobei

V_{LP} = Kaufpreisentwicklung [€/F*a]
 ρ_{LP} = Entwicklungsrate Kaufpreis [%/a]
 LP = Kaufpreis für einen LKW [€/F]

$$LP(t) = \int_0^t [V_{LP}(\tau)] \delta\tau + LP(0) \quad (5.58)$$

$$r\bar{w} = rw \alpha_{VL} LP \quad (5.59)$$

wobei

$r\bar{w}$ = Durchschnittlicher Restwert [€/F]
 rw = Restwert [%]

$$c_{LA} = \frac{LP - r\bar{w} - \frac{RP}{F}}{l} \rho_{LA} fb \quad (5.60)$$

wobei

c_{LA} = Leistungsabschreibung pro km [€/km]
 F = Fahrten [F]
 ρ_{LA} = Leistungsabschreibungsrate [%]

Die *Instandhaltungs- und Reparaturkosten* c_{IR} werden von der *Lauflistung auf der Letzten Meile* l_{LM} beeinflusst.

$$V_{IR} = \rho_{IR} IR \quad (5.61)$$

wobei

V_{IR} = Entwicklung der Instandhaltungs- und Reparaturkosten [€/(km*a)]
 ρ_{IR} = Entwicklungsrate Instandhaltungs- und Reparaturkosten [%/a]
 IR = Instandhaltungs- und Reparaturkosten pro km [€/km]

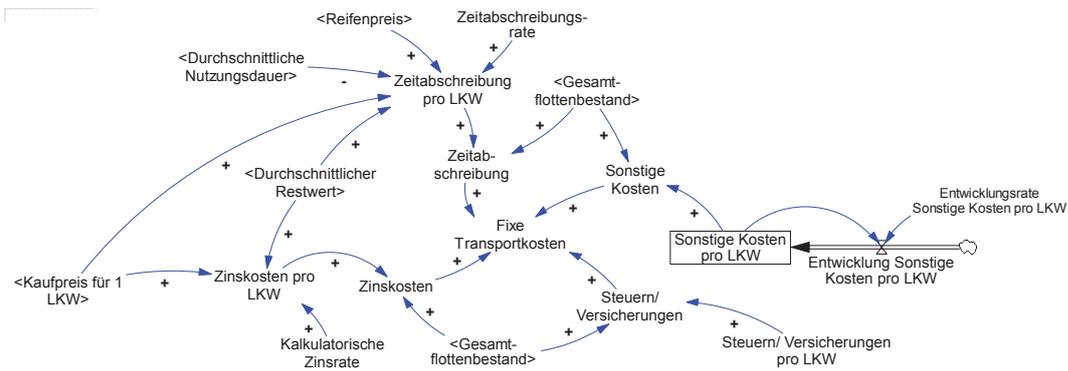


Abbildung 5.9.: Flussdiagramm zur Entwicklung der fixen Transportkosten (Eigene Darstellung nach [163]).

$$IR(t) = \int_0^t [V_{IR}(\tau)] \delta \tau + IR(0) \quad (5.62)$$

$$c_{IR} = l_{LM} IR \quad (5.63)$$

wobei

c_{IR} = Instandhaltungs- und Reparaturkosten [€/a]

Demzufolge setzen sich die *variablen Transportkosten* c_L aus der Summe der aufgeführten Kostenbestandteile zusammen, wobei die Kraftstoff- c_K , Adblue- c_{AB} , Reifen- c_R und Leistungsabschreibungskosten pro km c_{LA} noch in Bezug zur Laufleistung auf der Letzten Meile l_{LM} gesetzt werden müssen, um für diese die Kosten pro Jahr zu berechnen.

$$c_L = c_{IR} + c_{SC} + (l_{LM} (c_K + c_{AB} + c_R + c_{LA})) \quad (5.64)$$

wobei

c_L = Variable Transportkosten [€/a]

In der Abbildung 5.9 werden die *fixen Transportkosten* c_F mittels eines Flussdiagramms aufgezeigt.

5. Formalisierung des Kopplungsansatzes

Die *Zeitabschreibung* c_{ZA} ist von den *Reifenpreisen* RP , dem *Kaufpreis* LP für neue Fahrzeuge, der *durchschnittlichen Nutzungsdauer* t_{ND} und dem *durchschnittlichen Restwert* $r\bar{w}$ sowie dem *Transportbestand* fb abhängig.

$$c_{ZL} = \frac{LP - r\bar{w} - \frac{RP}{F}}{t_{ND}} \rho_{ZA} \quad (5.65)$$

wobei

c_{ZL} = Zeitabschreibung pro LKW [(€/F)/a]

ρ_{ZA} = Zeitabschreibungsrate [%]

$$c_{ZA} = c_{ZL} fb \quad (5.66)$$

wobei

c_{ZA} = Zeitabschreibung [€/a]

Die *Zinskosten* c_{ZI} resultieren aus dem Zusammenhang zwischen dem *durchschnittlichen Restwert* $r\bar{w}$, dem *Kaufpreis* LP für neue Fahrzeuge und dem *Gesamtflottenbestand* fb des KEP-Dienstleisters.

$$c_{ZC} = \frac{LP + r\bar{w}}{2} \rho_{KZ} \quad (5.67)$$

wobei

c_{ZC} = Zinskosten pro LKW [(€/F)/a]

ρ_{KZ} = Kalkulatorische Zinsrate [%/a]

$$c_{ZI} = c_{ZC} fb \quad (5.68)$$

wobei

c_{ZI} = Zinskosten [€/a]

Steuern und Versicherungen c_{SV} sind vom *Gesamtflottenbestand* fb des KEP-Dienstleisters abhängig.

$$c_{SV} = SV fb \quad (5.69)$$

wobei

c_{SV} = Steuern und Versicherungen [€/a]

SV = Steuern und Versicherungen pro LKW [(€/F)/a]

Sonstige Kosten c_{SO} (z. B. Kosten für die Fuhrparkverwaltung, die Unterstellung der Fahrzeuge bzw. Garagen) werden durch die Fuhrparkgröße bzw. den *Gesamtflottenbestand* fb beeinflusst.

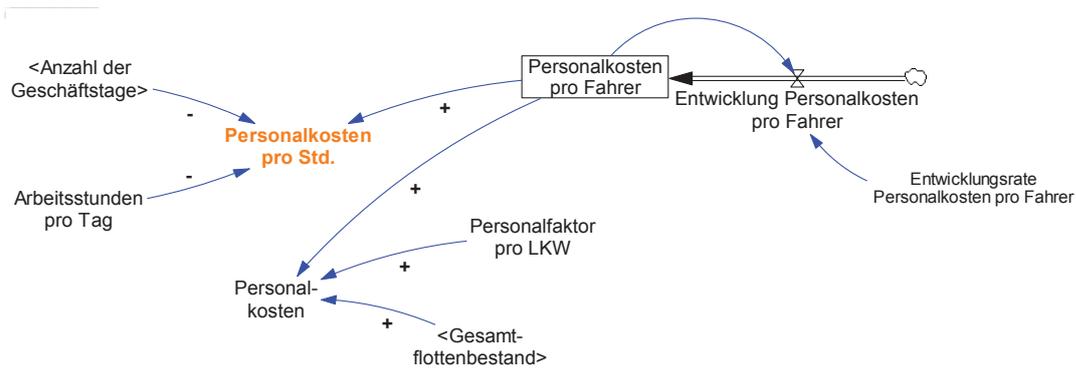


Abbildung 5.10.: Flussdiagramm zur Entwicklung der zeitlich abhängigen Transportkosten (Eigene Darstellung nach [163]).

$$V_{SO} = \rho_{SO} SO \quad (5.70)$$

wobei

V_{SO} = Entwicklung der sonstigen Kosten pro LKW [(€/F)/a*a]

ρ_{SO} = Entwicklungsrate der sonstigen Kosten pro LKW [%/a]

SO = Sonstigen Kosten pro LKW [(€/F)/a]

$$SO(t) = \int_0^t [V_{SO}(\tau)] \delta\tau + SO(0) \quad (5.71)$$

$$c_{SO} = SO \cdot fb \quad (5.72)$$

wobei

c_{SO} = Sonstige Kosten [€/a]

Demzufolge setzen sich die *fixen Transportkosten* c_F aus der Zeitabschreibung c_{ZA} , den Zinskosten c_{ZI} , den Steuern und Versicherungen c_{SV} sowie den sonstigen Kosten c_{SO} pro Jahr zusammen.

$$c_F = c_{ZA} + c_{ZI} + c_{SV} + c_{SO} \quad (5.73)$$

wobei

c_F = Fixe Transportkosten [€/a]

Zu den *zeitlich abhängigen Transportkosten* gehören die *Personalkosten* c_{PK} , die in Abhängigkeit des *Gesamtflottenbestands* fb und der *Personalkosten pro Fahrer* PK resultieren. (siehe Abbildung 5.10)

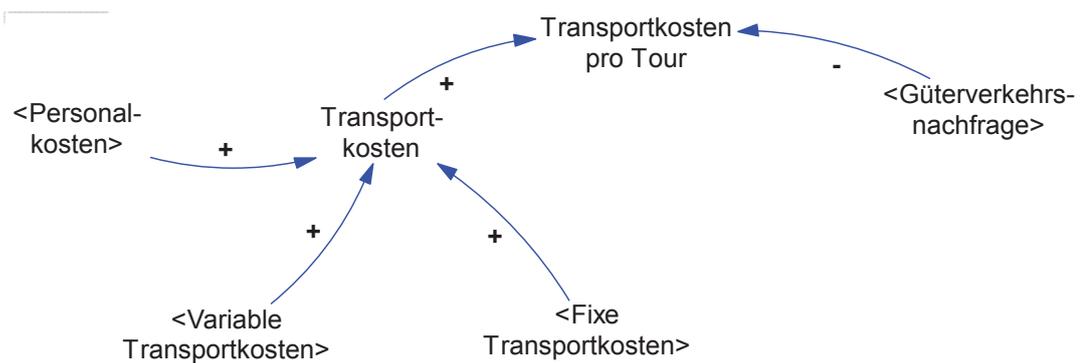


Abbildung 5.11.: Flussdiagramm zur Entwicklung der Gesamttransportkosten (Eigene Darstellung nach [163]).

$$V_{PK} = \rho_{PK} PK \quad (5.74)$$

wobei

- V_{PK} = Entwicklung der Personalkosten pro Fahrer [(€/a)/P]
- ρ_{PK} = Entwicklungsrate der Personalkosten pro Fahrer [%/a]
- PK = Personalkosten pro Fahrer [€/P]

$$PK(t) = \int_0^t [V_{PK}(\tau)]\delta\tau + PK(0) \quad (5.75)$$

$$c_{PK} = PK \beta_{PF} fb \quad (5.76)$$

wobei

- c_{PK} = Personalkosten [€/a]
- β_{PF} = Personalfaktor pro LKW [P/F]

Die Personalkosten pro Stunde pk_h sind von den Personalkosten pro Fahrer PK , der Anzahl der Einsatztage pro Jahr n_{GT} und den Arbeitsstunden pro Tag h_{AS} abhängig.

$$pk_h = \frac{PK}{n_{GT} h_{AS}} \quad (5.77)$$

wobei

- pk_h = Personalkosten pro Stunde [€/h]
- h_{AS} = Arbeitsstunden pro Tag [h/d]

Basierend auf den variablen, den fixen und den zeitlich abhängigen Transportkosten werden die *Gesamttransportkosten* c_T berechnet (siehe Abbildung 5.11).

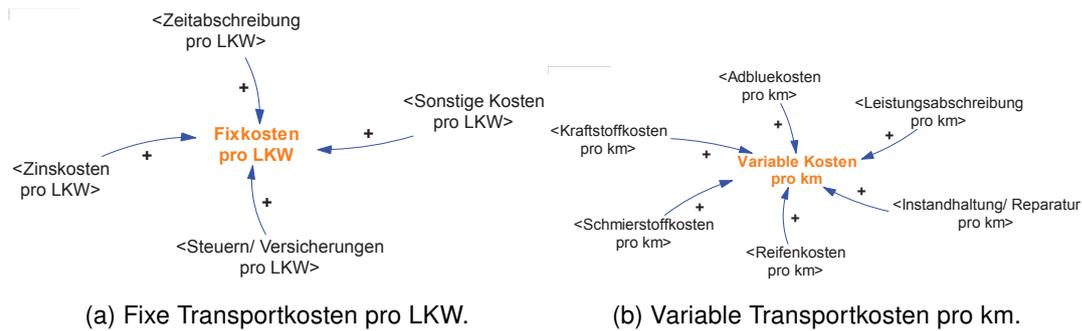


Abbildung 5.12.: Berechnung der mittleren Fixkosten pro LKW und der variablen Transportkosten pro km (Eigene Darstellung nach [163]).

$$c_T = c_L + c_F + c_{PK} \quad (5.78)$$

wobei

c_T = Gesamttransportkosten [€/a]

$$\bar{c}_T = \frac{c_T}{gvn} \quad (5.79)$$

wobei

\bar{c}_T = Durchschnittliche Transportkosten pro Tour [€/F]

Zur Anpassung des Transportkostenmodells eines Fahrzeugs in der MVS werden die jeweiligen mittleren *Fixkosten pro LKW* $c_{F,LKW}$, die leistungsabhängigen, *variablen Kosten pro km* $c_{L,km}$ und die zeitlich abhängigen *Personalkosten pro h* pk_h vom SD-Modell zur MVS transferiert.

$$c_{F,LKW} = c_{ZL} + c_{ZC} + SV + SO \quad (5.80)$$

wobei

$c_{F,LKW}$ = Fixe Kosten pro LKW [(€/F)/a]

$$c_{L,km} = c_K + c_{AB} + SC + c_R + c_{LA} + IR \quad (5.81)$$

wobei

$c_{L,km}$ = Variable Kosten pro km [€/km]

Die Abbildung 5.12 zeigt die zuvor formalisierten Zusammenhänge im Überblick.

Tabelle 5.5.: Kohortenmodell zum Emissionsmodul.

	1	2	3	4	5	6
Emissionstypen i	CO ₂	HC+NO _x	CO	PM ₁₀		
Emissionsklassen j	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4	EURO 5	EURO 6

5.1.3. Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage

Im folgenden Abschnitt wird die mathematische Formalisierung des Submoduls *Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage* diskutiert. Dieses Submodul basiert auf den Ansätzen von Aschauer et al. [6], Bossel [18, 20], Engel [39], Han und Hayashi [65], Heimgartner [66], IWW [72], Jifeng et al. [73], Jin et al. [74], Kuchenbecker [91], Lee [93], Pfaffenbichler [117], Raux et al. [121, 122], Ruutu et al. [129], Schade et al. [131], Schade [132], Yao et al. [174] sowie Zhan et al. [175].

Dieses Submodul wird von der Laufleistung auf der Letzten Meile und vom Kraftstoffverbrauch im KEP-Verkehr beeinflusst. Dabei werden die ökologischen Effekte des GV berücksichtigt.

In der Tabelle 5.5 wird die Klassifizierung der jeweiligen Emissionstypen i und Emissionsklassen j der Fahrzeuge aufgezeigt.

Zunächst werden die *CO₂ Emissionen* e_{1} , die vom Kraftstoff- kv und Adblueverbrauch av abhängig sind, für den GV berechnet. Hier wird davon ausgegangen, dass vornehmlich Fahrzeuge mit der Antriebsform *a Diesel* D im GV genutzt werden und sich im Einsatz befinden. In diesem Kontext muss zudem der CO₂ Konversionsfaktor des Adblueverbrauchs $\beta_{1,A}$ berücksichtigt werden.

$$e_{g,km,1} = \beta_{1,D} \bar{kv}_{km} + \beta_{1,A} \bar{av}_{km} \quad (5.82)$$

wobei

$$\begin{aligned} e_{g,km,1} &= \text{CO}_2 \text{ Emissionen GV pro km [kg/km]} \\ \beta_{1,D} &= \text{CO}_2 \text{ Konversionsfaktor für Antriebsform Diesel [kg/l]} \\ \beta_{1,A} &= \text{CO}_2 \text{ Konversionsfaktor für Adblueverbrauch [kg/l]} \end{aligned}$$

$$e_{g,1} = \beta_{1,D} kv + \beta_{1,A} av \quad (5.83)$$

wobei

$$e_{g,1} = \text{CO}_2 \text{ Emissionen GV [kg/a]}$$

In Abbildung 5.13 wird das Flussdiagramm als Basis zur Berechnung der CO₂ Emissionen im GV aufgezeigt.

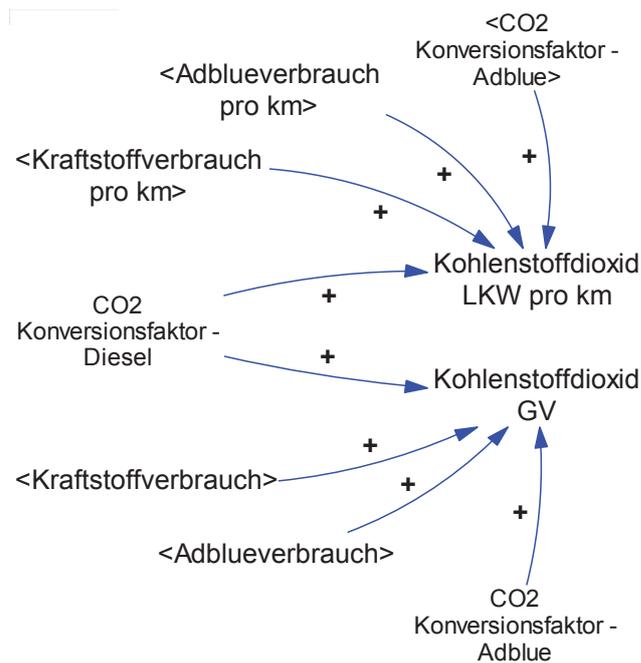


Abbildung 5.13.: Berechnung der CO₂ Emissionen im GV (Eigene Darstellung nach [163]).

Im Gegensatz dazu werden die weiteren Emissionen e_i (u. a. Kohlenstoffmonoxide [CO], Feinstaubpartikel [PM₁₀], Kohlenwasserstoffe [HC], Stickoxide [NO_x]) durch die *Laufleistung auf der Letzten Meile* l_{LM} beeinflusst. In diesem Fall gilt die zuvor aufgestellte, mathematische Formalisierung zur Berechnung der Konversionsfaktoren je Emissionstyp i der Antriebsform Diesel D .

$$\beta_i = \sum_{j=1}^n \alpha_j \beta_{i,j} \quad (5.84)$$

wobei

β_i = Konversionsfaktor des jeweiligen Emissionstyps i der Antriebsform Diesel [g/km]

α_j = Anteil der Fahrzeuge der Emissionsklasse j der Antriebsform Diesel [%]

$\beta_{i,j}$ = Konversionsfaktor des jeweiligen Emissionstyps i je Emissionsklasse j der Antriebsform Diesel [g/km]

In Abbildung 5.14a wird die Berechnung der Konversionsfaktoren für die Emissionen CO, PM₁₀, HC und NO_x für den GV dargestellt.

Abschließend erfolgt die Formalisierung zur Berechnung der Emissionen e_i . Nach Berechnung der Konversionsfaktoren werden diese Emissionen für den GV in Abhängigkeit der jeweils zurückgelegten Kilometer abgeleitet.

5. Formalisierung des Kopplungsansatzes

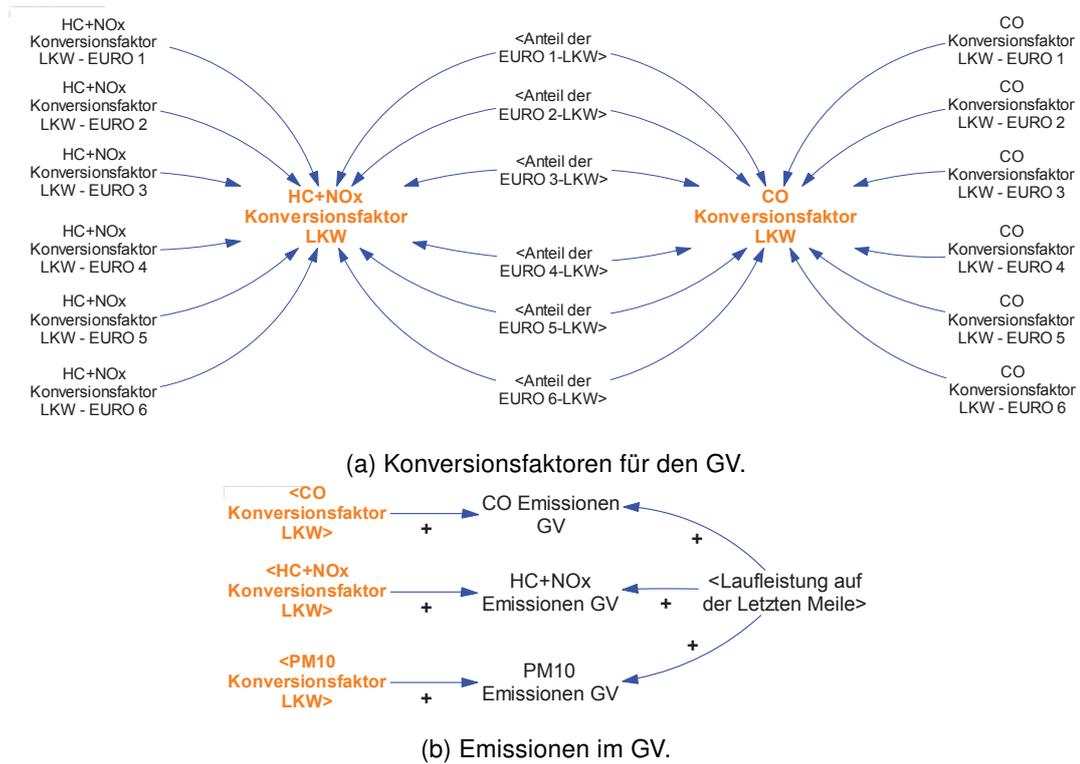


Abbildung 5.14.: Berechnung der weiteren Emissionen im GV (Eigene Darstellung nach [163]).

$$e_i = \beta_i l_{LM} \quad (5.85)$$

wobei

e_i = Emissionen des Typs i [g/a]

In der Abbildung 5.14b werden die zuvor beschriebenen Zusammenhänge in einem Flussdiagramm zur Veranschaulichung aufgezeigt.

Nach der SD-Simulation werden die Werte der *Konversionsfaktoren* pro LKW und km β_i der Abgasemissionen CO, PM₁₀, HC und NO_x vom SD-Modell an die MVS übergeben.

5.1.4. Überblick über das gesamte SD-Modell

In diesem Kapitel wurde ein SD-Modell vorgestellt, das die Entwicklung des KEP-Marktes auf urbaner Ebene abbildet und abschätzt. Das entwickelte SD-Modell erklärt, welche Auswirkungen die soziodemographische Entwicklung der Bevölkerung auf die Güternachfrage von Privatkunden hat. Zudem können mittels dieses Ansatzes die Effekte der Güternachfrageentwicklung auf die Güterverkehrsnachfrage beschrieben werden. Dabei

ist die Güterverkehrsnachfrage von der Güterverkehrskapazität bzw. der bestehenden Flottengröße abhängig. Die Entwicklung der Güterverkehrsnachfrage bewirkt zudem Veränderungen in der Flottenbestandsentwicklung. Die Güterverkehrsnachfrage beeinflusst die Entwicklung der Laufleistung auf der Letzten Meile und des Kraftstoffverbrauchs. Tourencharakteristika und die Entwicklung der Transportzeit können die Entwicklung der Güterverkehrskapazität und der -nachfrage sowie der Laufleistung auf der Letzten Meile im Zeitverlauf verändern. Die Transportkosten werden durch die Entwicklung der Laufleistung und des Flottenbestands beeinflusst. Die Entwicklung der Abgasemissionen ist abhängig von der Entwicklung der Laufleistung auf der Letzten Meile und des entsprechenden Kraftstoffverbrauchs im GV.

5.2. MVS

Aufgrund des vorliegenden Kopplungsansatzes müssen im Vergleich zu den Ansätzen nach Balmer et al. [8] und Schröder et al. [140] Anpassungen in der Modellierung vorgenommen werden. Im Folgenden wird die Formalisierung der MVS, in diesem Fall MATSim und Jsprit, vorgestellt. Dieser Schritt erfordert die Bestimmung der Rahmenbedingungen in der *Initialisierung der synthetischen Welt*, *Erzeugung der initialen Pläne der Agenten* sowie der Vorbereitung der *Datenanalyse*.

Für die eigentliche Simulation der MVS werden die Simulations- und Optimierungsverfahren nach Balmer et al. [8] und Schröder et al. [140] für die Simulationsschritte *Mobilitätssimulation* bzw. *Execution*, *Bewertung der Pläne* bzw. *Scoring* sowie *Planauswahl* und *Planerneuerung* bzw. *Replanning* genutzt und nicht verändert (siehe Kapitel 3.2). Diese Schritte werden im Folgenden zum Begriff *Mikrosimulation* zusammengefasst. MATSim und Jsprit werden hierbei als *Black-Box-Modelle* angesehen. Dies bedeutet, dass die Funktionsweise und der methodische Aufbau von MATSim und Jsprit bestehen bleiben und für den vorliegenden Ansatz genutzt werden.

Final werden die Endergebnisse (u. a. Anzahl der Fahrten, Distanzen, Zeiten, Kosten, Emissionen) im Schritt *Datenanalyse* untersucht. Die Messverfahren werden für den vorliegenden Ansatz eigens definiert.

In der Abbildung 5.15 wird dieser Modellierungs- und Simulationsprozess der MVS aufgezeigt.

5.2.1. Initialisierung der synthetischen Welt und der Nachfrage

Zur Initialisierung der synthetischen Welt müssen zunächst Eingangsgrößen definiert werden. MATSim und Jsprit benötigen zu diesem Zweck die betrachteten Agenten und das Infrastrukturnetzwerk in georeferenzierter Form. Diese werden im Gauß-Krüger-Koordinatensystem (GK4) hinterlegt. Im Rahmen des Fallbeispiels befinden sich KEP-Dienstleister mit ihren jeweiligen Distributionszentren und Abholstellen (u. a. Packstationen, Paketshops, Postfilialen) sowie private und gewerbliche Kunden im synthetischen Untersuchungsraum.

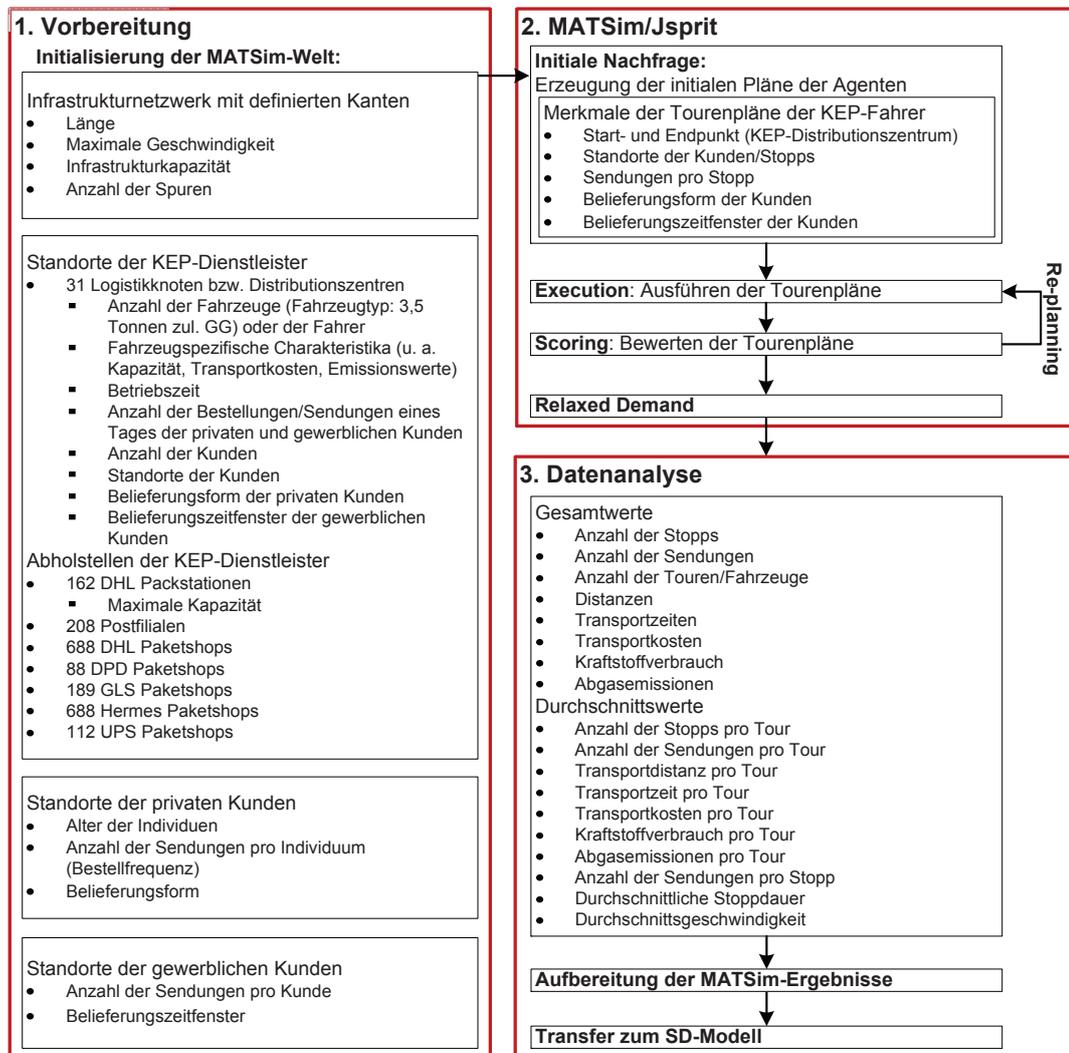


Abbildung 5.15.: Modellierung und Aufbereitung der MVS (Eigene Darstellung nach [160]).

Die Anzahl der Standorte dieser Agenten wird nicht durch die MEP fortgeschrieben und bleibt konstant. Ausnahmen sind dabei die privaten Kunden und die Packstationen, die von der MEP pro Zeitschritt aktualisiert werden.

Den jeweiligen Agenten bzw. deren Standorte werden Attribute mittels ausgewählter Verteilungsverfahren (u. a. Zufallsverteilung, Normalverteilung, Monte-Carlo-Simulation, Entropiemaximierung) zugewiesen. In der vorliegenden Arbeit werden die Attribute mittels Zufallsverteilung an die einzelnen Agenten verteilt.

Private Kunden Die Anzahl privater Personen n je Alterskohorte i pro statistischen Block, liegt in der synthetischen Welt georeferenziert vor. Zur Initialisierung der privaten Güternachfrage $gn_{p,MVS}$ werden zunächst die potentiellen Privatkunden der KEP-Dienstleister je Alterskohorte $n_{EC,i}$ bestimmt. Hierbei wird die Bevölkerungsanzahl je Alterskohorte b_i mit dem Anteil am E-Commerce je Alterskohorte $\alpha_{EC,i}$ multipliziert. Demzufolge gilt $b_i \alpha_{EC,i} = n_{EC,i}$. Dabei wird $n_{EC,i}$ extern vorgegeben.

Die private Güternachfrage $gn_{p,MVS}$, die von den KEP-Dienstleistern an einem typischen Tag im Untersuchungsgebiet ausgeliefert werden soll, wird extern definiert. Hierbei wird $gn_{p,MVS}$ zufällig auf die potentiellen Privatkunden der KEP-Dienstleister je Alterskohorte $n_{EC,i}$ verteilt. Ein Privatkunde sendet pro Tag einen Auftrag an den KEP-Dienstleister, wobei nur 1 Paket pro Privatkunde zugestellt werden soll.

Zur Belieferung der Privatkunden werden die drei Belieferungsformen Hauszustellung, Packstation und Paketshop bzw. Postfiliale extern vorgegeben. Die prozentualen Anteile der verschiedenen Belieferungsformen der Privatkunden werden exogen definiert und mittels Zufallsverteilung den Privatkunden zugeordnet. Im Basisszenario wird angenommen, dass Privatkunden nur die Direktzustellung bzw. Hauszustellung in Anspruch nehmen. Zudem wird für die MVS extern festgelegt, dass der KEP-Fahrer eine maximale Anzahl an Paketen pro Stopp abgeben darf. Die Belieferung der Privatkunden sollte innerhalb eines begrenzten Zeitfensters ausgeführt werden. Die Belieferung der Privatkunden erfolgt hierbei innerhalb der Betriebszeit des KEP-Dienstleisters.

Gewerbliche Kunden Die Standorte der gewerblichen Kunden der KEP-Dienstleister liegen in georeferenzierter Form vor.

Die gewerbliche Güternachfrage $gn_{o,MVS}$, die von den KEP-Dienstleistern an einem typischen Tag ausgeliefert werden soll, wird dabei extern vorgegeben. Die Güternachfrage pro gewerblicher Kunde $GNK_{o,MVS}$ wird gleichmäßig auf alle gewerblichen Kunden n_o in der synthetischen Welt verteilt. Dementsprechend gilt $\frac{gn_{o,MVS}}{n_o}$. Demzufolge wird die gewerbliche Nachfrage pro Kunde $GNK_{o,MVS}$ jedem KEP-affinen Unternehmen zugeordnet. Jeder gewerblicher Kunde sendet seinen Auftrag $GNK_{o,MVS}$ an den KEP-Dienstleister.

Gewerbliche Kunden der KEP-Dienstleister werden grundsätzlich direkt beliefert. Hierbei müssen nur die vom gewerblichen Kunden vorgegebenen Belieferungszeitfenster berücksichtigt werden, die extern definiert werden können.

Die Belieferungszeitfenster der gewerblichen KEP-Kunden müssen in diesem Zusammenhang vom KEP-Dienstleister bei der Routenplanung beachtet werden. Aufgrund des-

sen versuchen die KEP-Fahrer nicht nur zeiteffizient durch den Verkehr zu kommen, sondern auch die Belieferungszeitfenster der gewerblichen Kunden einzuhalten. Der prozentuale Anteil der möglichen Belieferungszeitfenster wird exogen festgelegt und zufällig den gewerblichen Kunden zugeordnet. Zudem können die jeweiligen Belieferungszeitfenster mit Gewichten definiert werden.

Sowohl für private als auch für gewerbliche Kunden wird das Merkmal *Wahl zwischen verschiedenen KEP-Dienstleistern* nicht berücksichtigt. Hierbei wird angenommen, dass alle erhobenen Standorte im Untersuchungsraum zum gleichen KEP-Dienstleister gehören.

Um die *initialen Aktivitätspläne* der Agenten erzeugen zu können, müssen zunächst die Belieferungsrelationen von den KEP-Standorten zu den privaten und gewerblichen KEP-Kunden bestimmt werden. Diese Kunden senden ihren Auftrag, die Güternachfrage, dem KEP-Dienstleister zu. Diese Aufträge werden jeweils dem geographisch nächst gelegenen Distributionszentrum des KEP-Dienstleisters zugeordnet. Somit beliefern die Distributionszentren nur die Kunden, die diesem Standort zugewiesen werden.

KEP-Dienstleister Die Initialisierung des KEP-Dienstleisters erfolgt nach den Vorgaben von Schröder [140] (siehe Kapitel 3.2) und wird an die eigenen Erfordernisse angepasst.

Zunächst liegen Logistikknoten bzw. Distributionszentren und Abholstellen (u. a. Packstationen, Postfilialen und Paketshops) der KEP-Dienstleister für den Untersuchungsraum in georeferenzierter Form vor.

Der Flottenbestand für das gesamte Untersuchungsgebiet fb wird dabei extern vorgegeben. Jedem Distributionszentrum wird jeweils eine Anzahl an verfügbaren LKW zugewiesen. Hierbei wird angenommen, dass an alle Distributionszentren n_{DZ} dieselbe Anzahl an LKW zugeordnet wird. Um den Flottenbestand je Distributionszentrum $fb_{CEP,i}$ zu bestimmen, gilt die Berechnung $\frac{fb}{n_{DZ}}$. In dieser Arbeit wird im Basisszenario nur ein Fahrzeugtyp mit den folgenden Attributen definiert.

- Zulässiges Gesamtgewicht [t]
- Maximale Kapazität [PE/F]
- Fixe Kosten $c_{F,LKW,MVS}$ [€/d]
- Variable Kosten $c_{L,m,MVS}$ [€/m]
- Zeitabhängige Kosten bzw. Personalkosten $pk_{s,MVS}$ [€/s]
- Kraftstoffverbrauch $\bar{k}v_{m,MVS}$ [l/m]
- Adblueverbrauch $\bar{a}v_{m,MVS}$ [l/m]
- Maximale Geschwindigkeit v_{max} [m/s]

In Jsprit kann definiert werden, ob das Distributionszentrum über eine finite oder infinite Flotte verfügt. Für das Basisszenario wird angenommen, dass jedes Distributionszentrum zwar auf einen initialen Flottenbestand $fb_{CEP,i}$ zugreifen kann. Jedoch wird in Jsprit festgelegt, dass der KEP-Dienstleister über eine infinite Flotte verfügt, falls mehr Fahrzeuge zur Auslieferung der Pakete notwendig sind.

Hinsichtlich der Dauer für einen Stopp werden eine Stoppzeitkonstante und -variable pro Sendung extern definiert. Die Stoppzeitkonstante t_{stk} gibt an, wie viel Zeit der KEP-Fahrer für den Hin- und Rückweg vom und zum LKW benötigt. Dagegen wird unter der Stoppzeitvariablen t_s der Zeitaufwand verstanden, den der KEP-Fahrer zur Auslieferung pro Sendung braucht. Dementsprechend handelt es sich um die Stoppdauer je zugestellter Sendung.

Der CO₂ Konversionsfaktor für Diesel $\beta_{1,D}$ [kg/l] und für Adblue $\beta_{1,A}$ [kg/l] sowie die Konversionsfaktoren $\beta_{i,a,MVS}$ [g/m] der Emissionen CO, HC, NO_x und PM₁₀ werden extern vorgegeben.

Auch die Betriebszeit des KEP-Dienstleisters wird extern definiert. Demzufolge muss die Startzeit für die Fahrzeuge und die Endzeit im Vorfeld festgelegt werden.

Die entsprechenden Attribute des KEP-Dienstleisters sind im Vorfeld bekannt und werden mittels Zufallsverteilung an die Distributionszentren verteilt. Jedes Distributionszentrum des KEP-Dienstleisters verfügt hierbei über folgende Attribute und Informationen.

- Anzahl der Fahrzeuge mit spezifischen Fahrzeugcharakteristika
- Betriebszeit
- Anzahl der Aufträge/Sendungen eines Tages der privaten und gewerblichen Kunden
- Anzahl und Standorte der privaten und gewerblichen Kunden
- Belieferungsform der privaten Kunden
- Belieferungszeitfenster der gewerblichen Kunden

Dementsprechend können im nächsten Schritt die initialen Pläne der Güterverkehrsagenten erzeugt werden. Vor jeder MATSim-Iteration wird die initiale Güternachfrage der KEP-Kunden an Jsprit zur Generierung der initialen Tourenpläne der KEP-Fahrer weitergeleitet. Hierbei sind die Start- und Endpunkte der Touren, in diesem Fall die KEP-Distributionszentren, bekannt. Auch wurden die Standorte der Kunden in die synthetische Welt integriert. Zudem kennt dieser die Anzahl der Sendungen pro Senke bzw. Stopp. Bei privaten Kunden ist der KEP-Dienstleister über die gewünschte Belieferungsform je Privatkunde informiert. Bei gewerblichen Kunden wird der KEP-Dienstleister über die Belieferungszeitfenster, die er bei der Tourenplanung bzw. Routenwahl einhalten muss, in Kenntnis gesetzt.

Demzufolge beinhalten die Tourenpläne folgende Merkmale.

- Start- und Endpunkte der jeweiligen Touren (in diesem Fall die Distributionszentren des KEP-Dienstleisters)

- Punkte der Stopps (die Standorte der Kunden)
- Beauftragte Anzahl der Pakete pro Stopp
- Belieferungsform der privaten Kunden
- Belieferungszeitfenster der gewerblichen Kunden

Im Hinblick auf die Auslieferung der Pakete der privaten Güternachfrage fassen die KEP-Dienstleister Kundenaufträge je Stopp zusammen. Die Standorte dieser Kunden liegen in diesem Fall in nächster Nähe zueinander, in diesem Fall an einer Kante oder im selben statistischen Block. Hierbei wird für die MVS extern vorgegeben, dass der KEP-Fahrer eine maximale Anzahl pro Stopp abgeben darf. Dieses Prozedere gilt für Hauszustellungen privater Kunden. Im Basisszenario werden sowohl gewerbliche als auch private Kunden ausschließlich direkt beliefert. Die Merkmale der KEP-Tourenpläne sind der Abbildung 5.15 zu entnehmen.

5.2.2. Mikrosimulation

In der *Execution* werden die KEP-Fahrerpläne initial mittels Jsprit ausgeführt und mittels MATSim auf dem Infrastrukturnetzwerk simuliert. Für das Fallbeispiel wird festgelegt, dass sowohl Jsprit als auch MATSim nur eine Iteration pro betrachteten Zeitschritt ausführen. Hierbei soll die Optimierung und in diesem Zuge die Minimierung der Transportdistanzen, Transportzeiten und der benötigten Anzahl an LKW und damit auch der Transportkosten auf ein Minimum gehalten werden, um möglichst realistische KEP-Touren zu erzeugen. Zudem hat dies den Vorteil, dass weniger Daten pro Zeitschritt vom Arbeitsspeicher zur finalen Analyse vorgehalten werden müssen. Damit wird der Arbeitsspeicherbedarf reduziert.

Im *Scoring* werden die ausgeführten Pläne auf Basis von Nutzen-Kosten-Funktionen bewertet. Im *Replanning* werden diese Pläne ggf. verbessert bzw. optimiert. Dabei wird in jeder Iteration der Ruin-Recreate Algorithmus verwendet, der zum *Replanning* und dementsprechend zu einer weiteren *Execution* führt. Für die Optimierung der Touren wird eine Methode ausgewählt sowie stringent und konsistent verwendet. Zur Kalkulation der zeitabhängigen Kosten und der Ableitung der ökonomisch effizientesten Touren unter Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit wird der *Least Cost Path Algorithm (LCPA)* und der bereits implementierte *Dijkstra-Algorithmus* genutzt. Die optimale Sequenz, in der die Kunden auf einer Tour beliefert werden, wird durch einen *Vehicle Routing Algorithmus (VRA)* unter Berücksichtigung des *Travelling Salesman Problems* berechnet. Mittels des LCPA werden die optimale Anzahl an Fahrzeugen, die genutzten Fahrzeugtypen und die Routen bestimmt, um die Aufträge zu erfüllen. Die Touren sind von der Abfahrtszeit vom Kunden abhängig, wodurch die wenigsten Transportkosten und die tatsächlich notwendige Zeit für diese Touren definiert werden. [137]

Bei der Optimierung der Transportkosten im *Vehicle Routing Problem* werden folgende Nebenbedingungen angenommen. [137]

- Die Anzahl der Sendungen (Anzahl der Pakete) sind im Vorfeld bekannt.

- Die Transportzeit der Sendungen kann durch Belieferungszeitfenster, in diesem Fall der gewerblichen Kunden, eingeschränkt werden.
- Jedem Distributionszentrum wird eine Flotte zugeordnet, die aus der gleichen Anzahl an Fahrzeugen besteht; diese Fahrzeuge haben dieselben Kapazitäten und Kosten. Bei Bedarf kann der KEP-Dienstleister seinen Flottenbestand erhöhen, um seine Kundenaufträge erfüllen zu können.
- Alle Fahrzeuge starten und enden am Distributionszentrum.
- Jedes Fahrzeug kann nur eine Tour pro Tag ausführen.

Jsprit kann nicht die aktuelle Verkehrssituation in der MATSim-Simulation berücksichtigen. Stattdessen nutzt es nur das MATSim-Netzwerk für die reine Wegesuche (unter Verwendung des Dijkstra-Algorithmus).

Um nun dem KEP-Dienstleister zu erlauben, weitere Verkehrsteilnehmer im Infrastruktursystem zu beachten, wird eine Kopie des MATSim-Netzwerks erzeugt. Durch die Berücksichtigung des gesamten Verkehrsaufkommens gelingt dem KEP-Dienstleister, darauf entsprechend zu reagieren. In der Netzwerkkopie von Jsprit werden die Geschwindigkeitswerte im Netzwerk entsprechend den gemessenen Geschwindigkeiten in der MATSim-Simulation angepasst. Vor jeder MATSim-Simulation (eine MATSim-Simulation pro Kopplungsiteration) führt Jsprit die KEP-Tourenpläne auf der angepassten Netzwerkkopie aus. Diese Touren, welche die KEP-Dienstleister von Jsprit erhalten, werden in MATSim-Aktivitätspläne übersetzt, um basierend darauf in die MATSim-Population eingespeist zu werden. Danach wird die MATSim-Simulation ausgeführt. Im Zuge dessen können die Tourenpläne der KEP-Fahrer und die Aktivitätspläne des MIV zur selben Zeit auf dem Infrastrukturnetzwerk simuliert werden, um das Verkehrsstauniveau zu bestimmen und die wechselseitige Beeinflussung der jeweiligen Verkehrsteilnehmer zu untersuchen. Auf die Simulation der Aktivitätspläne des MIV wird in dieser Arbeit verzichtet. Jedoch werden die Durchschnittsgeschwindigkeiten je Kante im Netz vermindert, die den Widerstand bzw. das Verkehrsstauniveau im Netz bedingt durch die MIV-Aktivitäten abbilden. Dieses Vorgehen erlaubt die Messung der erreichbaren Durchschnittsgeschwindigkeiten auf der Verkehrsinfrastruktur.

Demzufolge sind die Restriktionen für den KEP-Dienstleister vornehmlich die begrenzte Arbeitszeit der KEP-Fahrer und das Verkehrsstauniveau bzw. die erreichbare Geschwindigkeit im Verkehrssystem. Die Fahrzeugkapazität wird in diesem Kontext nicht als restriktiver Faktor angesehen, da die KEP-Fahrer nur eine begrenzte Anzahl an Paketen während ihrer Arbeitszeit ausliefern können.

5.2.3. Datenanalyse

Bevor die finalen Ergebnisse der MVS-Simulationsläufe im Detail analysiert werden können, erfolgt die Formalisierung der Algorithmen zur Bemessung der jeweiligen Variablenwerte.

Berechnung der Gesamtwerte Nun werden die Gesamtwerte der Verkehrskenngrößen für den Güterverkehr berechnet. Zur Bemessung der Anzahl der Stopps pro Tag st_{MVS} werden die Stopps, die vom gesamten Flottenbestand pro Tag ausgeführt wurden, gezählt. Die Formel (5.86) wird zudem zur Berechnung der Stopps pro Tag, die zur Belieferung privater $st_{p,MVS}$ und gewerblicher Kunden $st_{o,MVS}$ getätigt werden, genutzt.

$$st_{MVS} = \sum_{i=1}^n st \quad (5.86)$$

wobei

st_{MVS} = Anzahl der Stopps pro Tag [St/d]
 st = Stopp [St]

Die ausgelieferten Sendungen bzw. die Güternachfrage pro Tag gn_{MVS} , die bedient wurde, werden nach der Simulation akkumuliert. Die Formel (5.87) findet zudem für die Sendungen an private $gn_{p,MVS}$ und gewerbliche Kunden $gn_{o,MVS}$ Verwendung.

$$gn_{MVS} = \sum_{i=1}^n s \quad (5.87)$$

wobei

gn_{MVS} = Güternachfrage bzw. ausgelieferte Sendungen pro Tag [PE/d]
 s = Sendung [PE]

Die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge bzw. die notwendigen Touren gvn_{MVS} zur Auslieferung der Sendungen pro Tag werden von der MVS berechnet.

$$gvn_{MVS} = \sum_{i=1}^n T \quad (5.88)$$

wobei

gvn_{MVS} = Gesamtgüterverkehrsnachfrage [F/d]
 T = Tour [F]

Des Weiteren wird die gesamte Transportdistanz bzw. die Laufleistung pro Tag l_{MVS} , die zurückgelegte Strecke der eingesetzten Fahrzeugflotte, auf dem Straßennetz gemessen. Da die Straßeninfrastruktur einen gerichteten Graphen G mit einer Menge an Kanten E , die durch eine Menge an Knoten K verbunden sind, darstellt, wird folgende Bemessung vorgenommen. Hierbei werden nur die Kanten E_i berücksichtigt, die von den Fahrzeugen befahren werden.

$$l_{MVS} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (5.89)$$

wobei

l_{MVS} = Gesamtlauflistung pro Tag [m/d]
 E_i = Länge einer Kante i [m]

Die Transportzeit $t_{TZ,MVS}$, die innerhalb eines Tages von der gesamten Fahrzeugflotte zur Auslieferung der Sendungen benötigt wird, wird mittels des Abgleichs zwischen der Startzeit $t_{start,TZ}$ vom und der Ankunftszeit $t_{end,TZ}$ am Distributionszentrum pro Fahrzeug gemessen und akkumuliert. Diese Transportzeit umfasst nur die reine Fahrzeit.

$$t_{TZ,MVS} = \sum_{i=1}^n t_{end,TZ} - t_{start,TZ} \quad (5.90)$$

wobei

$t_{TZ,MVS}$ = Transportzeit pro Tag [s/d]
 $t_{end,TZ}$ = Ankunftszeit eines Fahrzeugs am Distributionszentrum [s]
 $t_{start,TZ}$ = Startzeit eines Fahrzeugs vom Distributionszentrum [s]

Zur Berechnung der Stoppzeit pro Tag $t_{ST,MVS}$ werden jeweils die Ankunftszeit $t_{start,ST}$ an und die Abfahrtszeit $t_{end,ST}$ von jedem Stoppstandort i berücksichtigt.

$$t_{ST,MVS} = \sum_{i=1}^n t_{end,ST} - t_{start,ST} \quad (5.91)$$

wobei

$t_{ST,MVS}$ = Stoppzeit pro Tag [s/d]
 $t_{end,ST}$ = Abfahrtszeit eines Fahrzeugs vom Stoppstandort i [s]
 $t_{start,ST}$ = Ankunftszeit eines Fahrzeugs am Stoppstandort i [s]

Die Gesamttransportzeit $t_{GT,MVS}$ ergibt sich somit aus der Summe der Stoppzeit $t_{ST,MVS}$ und der Transportzeit pro Tag $t_{TZ,MVS}$.

$$t_{GT,MVS} = t_{TZ,MVS} + t_{ST,MVS} \quad (5.92)$$

wobei

$t_{GT,MVS}$ = Gesamttransportzeit pro Tag [s/d]

Aus den Vorgaben der fahrzeugspezifischen Charakteristika und der Berücksichtigung von gvn_{MVS} , l_{MVS} und $t_{GT,MVS}$ können nun die Transportkosten pro Tag $c_{GT,MVS}$ berechnet werden.

5. Formalisierung des Kopplungsansatzes

$$c_{F,MVS} = g_{vn,MVS} c_{F,LKW} \quad (5.93)$$

wobei

$$\begin{aligned} c_{F,MVS} &= \text{Fixe Transportkosten pro Tag [€/d]} \\ c_{F,LKW} &= \text{Fixe Transportkosten pro LKW [€/F]} \end{aligned}$$

$$c_{L,MVS} = l_{MVS} c_{L,m} \quad (5.94)$$

wobei

$$\begin{aligned} c_{L,MVS} &= \text{Variable Transportkosten pro Tag [€/d]} \\ c_{L,m} &= \text{Variable Transportkosten pro m [€/m]} \end{aligned}$$

$$pk_{s,MVS} = t_{GT,MVS} pk_s \quad (5.95)$$

wobei

$$\begin{aligned} pk_{s,MVS} &= \text{Personalkosten pro Tag [€/d]} \\ pk_s &= \text{Personalkosten pro Sekunde [€/s]} \end{aligned}$$

$$c_{GT,MVS} = c_{F,MVS} + c_{L,MVS} + pk_{s,MVS} \quad (5.96)$$

wobei

$$c_{GT,MVS} = \text{Gesamttransportkosten pro Tag [€/d]}$$

Auf Basis der Berechnung des Kraftstoff- kv_{MVS} und des Adblueverbrauchs pro Tag av_{MVS} werden die CO₂ Emissionen pro Tag $e_{1,MVS}$ abgeleitet. av_{MVS} lässt sich dabei in derselben Weise wie kv_{MVS} berechnen (siehe Formel (5.97)).

$$kv_{MVS} = \bar{kv}_m l_{MVS} \quad (5.97)$$

wobei

$$\begin{aligned} kv_{MVS} &= \text{Kraftstoffverbrauch pro Tag [l/d]} \\ \bar{kv}_m &= \text{Kraftstoffverbrauch pro Meter [l/m]} \end{aligned}$$

$$e_{1,MVS} = kv_{MVS} \beta_{1,D} + av_{MVS} \beta_{1,A} \quad (5.98)$$

wobei

$$\begin{aligned} e_{1,MVS} &= \text{CO}_2 \text{ Emissionen GV pro Tag [kg/d]} \\ \beta_{1,D} &= \text{CO}_2 \text{ Konversionsfaktor für Antriebsform Diesel [kg/l]} \\ \beta_{1,A} &= \text{CO}_2 \text{ Konversionsfaktor für Adblue [kg/l]} \end{aligned}$$

Die weiteren Emissionen CO, HC+NO_x sowie PM₁₀ pro Tag $e_{i,MVS}$ werden unter Berücksichtigung der Transportdistanz pro Tag l_{MVS} nach der folgenden Formel berechnet.

$$e_{i,MVS} = \beta_i l_{MVS} \quad (5.99)$$

wobei

$e_{i,MVS}$ = Emissionen des Typs i pro Tag [g/d]
 β_i = Konversionsfaktor des Emissionstyp i pro Meter [g/m]

Berechnung der Mittelwerte In diesem Kontext werden Werte zur Charakterisierung einer Tour oder eines Stopps berechnet. Diese werden durch das Verhältnis aus dem jeweiligen Gesamtwert zur Gesamtanzahl der ausgeführten Touren gn_{MVS} oder Stopps st_{MVS} abgeleitet.

Die durchschnittliche Anzahl der Stopps pro Tour $\bar{st}_{T,MVS}$ über alle Touren wird nach der Formel (5.100) spezifiziert. Die Formel gilt auch zur Berechnung der Anzahl der Stopps pro Tour zur Belieferung der Privatkunden $\bar{st}_{p,T,MVS}$ und der gewerblichen Kunden $\bar{st}_{o,T,MVS}$.

$$\bar{st}_{T,MVS} = \frac{st_{MVS}}{gn_{MVS}} \quad (5.100)$$

wobei

$\bar{st}_{T,MVS}$ = Mittlere Anzahl der Stopps pro Tour [St/F]

Die mittlere Güternachfrage bzw. die Anzahl der Sendungen pro Tour $\bar{s}_{T,MVS}$ resultiert aus der Berechnung (5.101). Diese Formel findet auch zur Berechnung der privaten $\bar{s}_{p,T,MVS}$ und gewerblichen Sendungen pro Tour $\bar{s}_{o,T,MVS}$ Verwendung.

$$\bar{s}_{T,MVS} = \frac{gn_{MVS}}{gn_{MVS}} \quad (5.101)$$

wobei

$\bar{s}_{T,MVS}$ = Mittlere Anzahl der Sendungen pro Tour [PE/F]

Die mittlere Transportdistanz pro Tour $\bar{d}_{T,MVS}$ lässt sich nach der Formel (5.102) berechnen.

$$\bar{d}_{T,MVS} = \frac{l_{MVS}}{gn_{MVS}} \quad (5.102)$$

wobei

$\bar{d}_{T,MVS}$ = Mittlere Transportdistanz pro Tour [m/F]

5. Formalisierung des Kopplungsansatzes

Die mittlere Transportzeit $\bar{t}_{TZ,T,MVS}$ wird mittels der Formel (5.103) bestimmt.

$$\bar{t}_{TZ,T,MVS} = \frac{t_{TZ,MVS}}{gvn_{MVS}} \quad (5.103)$$

wobei

$\bar{t}_{TZ,T,MVS}$ = Mittlere Transportzeit pro Tour [s/F]

Die mittlere Gesamttransportzeit pro Tour $\bar{t}_{GT,T,MVS}$ lässt sich mittels der Gleichung (5.104) ermitteln.

$$\bar{t}_{GT,T,MVS} = \frac{t_{GT,MVS}}{gvn_{MVS}} \quad (5.104)$$

wobei

$\bar{t}_{GT,T,MVS}$ = Mittlere Gesamttransportzeit pro Tour [s/F]

Ferner wird die Formalisierung der mittleren Transportkosten pro Tour $\bar{c}_{T,MVS}$ vorgenommen (siehe Formel (5.105)). Zudem dient diese Formel zur Berechnung der Fixkosten $\bar{c}_{F,T,MVS}$, der variablen Kosten $\bar{c}_{L,T,MVS}$ sowie der Personalkosten pro Tour $\bar{p}k_{s,T,MVS}$.

$$\bar{c}_{T,MVS} = \frac{c_{GT,MVS}}{gvn_{MVS}} \quad (5.105)$$

wobei

$\bar{c}_{T,MVS}$ = Mittlere Transportkosten pro Tour [€/F]

Sowohl der Kraftstoff- $\bar{k}v_{T,MVS}$ als auch der Adblueverbrauch pro Tour $\bar{a}v_{T,MVS}$ werden mittels der folgenden Formel berechnet.

$$\bar{k}v_{T,MVS} = \frac{kv_{MVS}}{gvn_{MVS}} \quad (5.106)$$

wobei

$\bar{k}v_{T,MVS}$ = Kraftstoffverbrauch pro Tour [l/F]

Weiterführend werden die mittleren Abgasemissionen pro Tour $\bar{e}_{1,T,MVS}$ und $\bar{e}_{i,T,MVS}$ berechnet (siehe Formeln (5.107), (5.108)).

$$\bar{e}_{1,T,MVS} = \frac{e_{1,MVS}}{gvn_{MVS}} \quad (5.107)$$

wobei

$\bar{e}_{1,T,MVS}$ = CO₂ Emissionen pro Tour [kg/F]

$$\bar{e}_{i,T,MVS} = \frac{e_{i,MVS}}{gvn_{MVS}} \quad (5.108)$$

wobei

$\bar{e}_{i,T,MVS}$ = Abgasemissionen pro Tour [g/F]

Als nächstes folgt die Berechnung der mittleren Anzahl der Sendungen pro Stopp bzw. des mittleren Dropfaktors $\bar{\beta}_{MVS}$ (siehe Formel (5.109)). Diese Formel gilt auch zur Bestimmung des Dropfaktors des Privatkunden- $\bar{\beta}_{p,MVS}$ und des B2B-Segments $\bar{\beta}_{o,MVS}$.

$$\bar{\beta}_{MVS} = \frac{gn_{MVS}}{st_{MVS}} \quad (5.109)$$

wobei

$\bar{\beta}_{MVS}$ = Anzahl der Sendungen pro Stopp [PE/St]

Die durchschnittliche Stoppdauer $\bar{t}_{st,MVS}$ resultiert aus dem Zusammenhang zwischen der Stoppzeit $t_{ST,MVS}$ und der Anzahl der Stopps pro Tag st_{MVS} (siehe Gleichungen (5.91), (5.86)).

$$\bar{t}_{st,MVS} = \frac{t_{ST,MVS}}{st_{MVS}} \quad (5.110)$$

wobei

$\bar{t}_{st,MVS}$ = Durchschnittliche Stoppdauer [s/St]

Abschließend wird die Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v}_{MVS} im Straßenverkehrsnetz berechnet. Hierzu wird jede Kante E_i , die von der Fahrzeugflotte befahren wird, hinzugezogen. Zudem werden je Kante E_i die Einfahrtszeit in die Kante E_i und Ausfahrtszeit aus der Kante E_i erfasst. Damit wird zunächst die akkumulierte Geschwindigkeit v_{MVS} aller Kanten E_i gemessen.

$$v_{MVS} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{t_{end,E_i} - t_{start,E_i}} \quad (5.111)$$

wobei

v_{MVS} = Akkumulierte Geschwindigkeit [m/s]

t_{end,E_i} = Ausfahrtszeit aus der Kante E_i [s]

t_{start,E_i} = Einfahrtszeit in die Kante E_i [s]

Zur Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v}_{MVS} wird das Verhältnis aus der akkumulierten Geschwindigkeit v_{MVS} zur Anzahl der befahrenen Kanten n_{E_i} genommen.

$$\bar{v}_{MVS} = \sum_{i=1}^n \frac{v_{MVS}}{n_{E_i}} \quad (5.112)$$

wobei

$$\begin{aligned} \bar{v}_{MVS} &= \text{Durchschnittsgeschwindigkeit [m/s]} \\ n_{E_i} &= \text{Anzahl der befahrenen Kanten } E_i [1] \end{aligned}$$

Als Ergebnis steht nun ein simulationsberechtigtes Basisszenario für den entsprechenden Untersuchungsraum zur Verfügung, das durch eine Implementierung von Maßnahmen-szenarien in weiteren Modellierungsschritten erweitert werden kann.

5.3. Kopplungsansatz

Das SD-Modell und die MVS sind mittels einer Kopplung miteinander verknüpft, um den Datentransfer und die gegenseitige Anpassung der Modelle in beide Richtungen zu erlauben. Zu diesem Zweck wurde ein methodisches Konzept für die Rückkopplung entwickelt, das bereits in Kapitel 2.5 im Detail beschrieben wurde. Die generalisierte Systemarchitektur wird für das Fallbeispiel angepasst. Der iterative, automatisierte Ablauf des Rückkopplungsansatzes wird in Abbildung 5.16 aufgezeigt. Zum Initialisieren des Rückkopplungsansatzes muss zunächst festgelegt werden, wie viele Adapteriterationen ausgeführt werden sollen bzw. welcher zeitliche Horizont für die strategische Verkehrsprognose betrachtet werden soll.

Für die vorliegende Arbeit wird bestimmt, dass der entwickelte Adapter je Iteration zunächst die MVS startet, die MVS-Ergebnisse aggregiert, danach die SD-Simulation ausführt und abschließend die SD-Ergebnisse zur erneuten Initialisierung der MVS disaggregiert. Diese vorgegebene Richtung des Iterationskreislaufs könnte auch in umgekehrter Reihenfolge erfolgen. Dies bedeutet, dass auch die SD-Simulation im ersten Schritt gestartet werden kann.

Mittels der Kopplung werden zudem das SD-Modell und die MVS initialisiert. Zunächst wird die MVS basierend auf initialen Parametern für einen typischen Tag im Jahr 2009 initialisiert und ausgeführt. Die MVS generiert Daten für einen typischen Tag. Hierbei wird jeweils für MATSim und Jsprit eine Iteration ausgeführt. Nach der MVS-Simulation werden die resultierenden Ergebnisse aufbereitet und aggregiert, um basierend darauf die SD-Parameter anzupassen.

Im nächsten Schritt wird die SD-Simulation ausgeführt. Das SD-Modell speichert die Werte der Langzeitprognose in 1-Tages Zeitschritten. Jedoch werden die Werte in der Zeiteinheit $Jahr(a)$ berechnet. Dementsprechend werden die Zeitschritte auf den Wert 0,00273973 gesetzt, das einem Tag eines Jahres entspricht. Somit gelingt eine sehr genaue Annäherung des Entwicklungsverlaufs. Danach werden die Werte der Parameter aus dem SD-Modell genommen und abgespeichert.

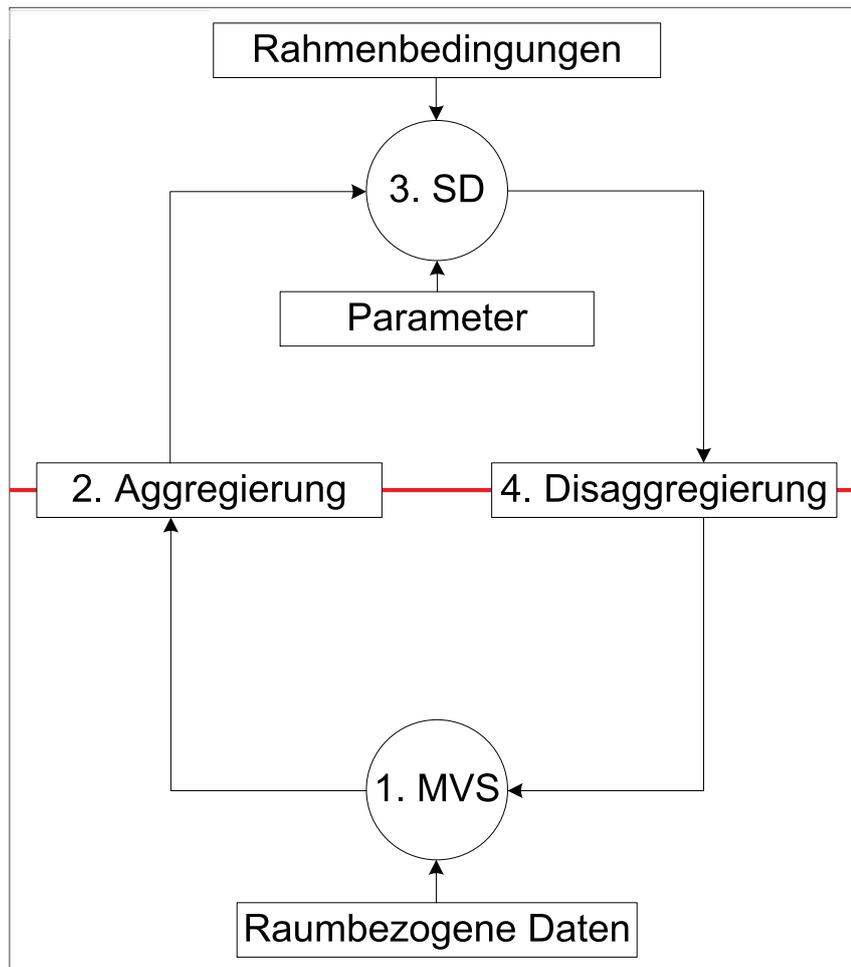


Abbildung 5.16.: Rückkopplungsansatz zwischen SD und MVS.

Nach der SD-Simulation werden die Werte der selektierten Parameter des letzten Prognosejahres für die MVS aufbereitet und transformiert. Aus diesem Grund werden die SD-Daten von 1-Jahres-Werten zu 1-Tages-Werte disaggregiert und zur MVS transferiert.

Dieses Vorgehen wird so oft wiederholt, wie zuvor definiert wurde. Im Rahmen des durchgeführten DFG-Projektes wurde diese technische Kopplung, die den Datentransfer zwischen dem SD-Modell und der MVS ermöglicht, umgesetzt. In der Abbildung 5.17 wird das Konzept zur technischen Kopplung nach Thaller und Clausen [160] sowie Thaller et al. [161] aufgezeigt.

Einerseits werden mittels des SD-Modells strukturelle Rahmenbedingungen bzw. Daten (u. a. Anzahl der Bevölkerung nach Altersklassen) generiert, die in der MVS zur Initialisierung der Welt genutzt werden.

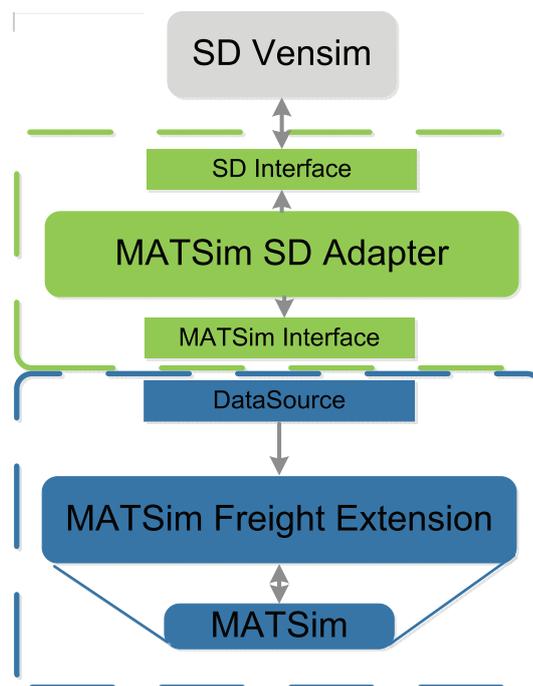


Abbildung 5.17.: Technischer Kopplungsansatz zwischen SD und MVS (Eigene Darstellung nach [160, 161]).

Andererseits dienen weitere SD-Parameter, die Verhaltensdaten darstellen, als Basis zur Erzeugung der Aktivitätspläne der Agenten (u. a. Privatpersonen, Einzelhändler, KEP-Dienstleister). Die Verhaltensparameter werden beispielsweise herangezogen, um die Entscheidung der Privatpersonen bezüglich ihres Bestellverhaltens (z. B. Belieferungsform) zu definieren. Hinsichtlich des Verhaltens des Einzelhändlers sind Bestellentscheidungen zur Ableitung und Charakterisierung ihrer Güternachfrage im Fokus. Zur Darstellung und Beschreibung des Verhaltens der KEP-Dienstleister sind Eingangsgrößen (wie z. B. Anzahl der auszuliefernden Pakete, Anzahl der Fahrzeuge, ökonomische und ökologische Charakteristika der Fahrzeuge, Betriebszeiten, Belieferungsformen, Belieferungszeitfenster und Entladezeiten) notwendig, um die initialen Tourenpläne der KEP-Fahrer für einen Tag zu erzeugen. Ein Tourenplan beinhaltet u. a. die Liefermenge je Kunde und die Belieferungsrelationen zur Generierung des Güterverkehrs. Zudem werden die Charakteristika der Verkehrsmittelwahl und der Tourenbildung in diesem Modellierungsschritt bestimmt.

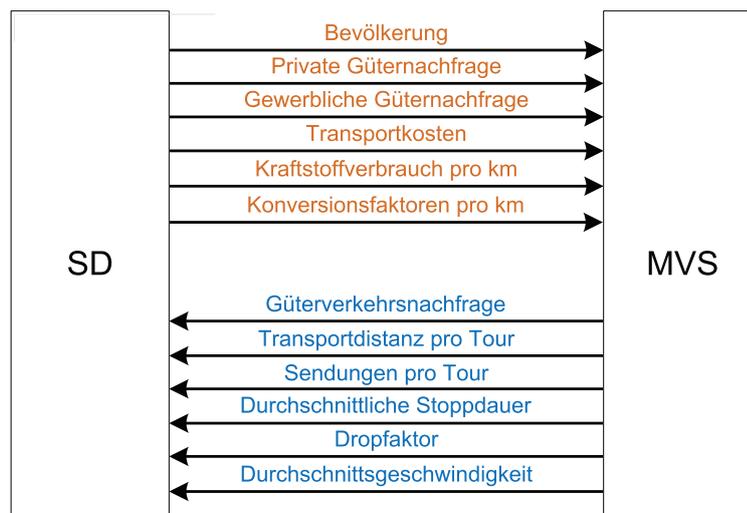


Abbildung 5.18.: Datentransfer zwischen SD und MVS.

Hingegen dienen die generierten Ergebnisse der MVS zur Anpassung der jeweiligen vom Gesamtverkehr räumlich und zeitlich beeinflussten Parameter (z. B. Fahrtenaufkommen, Transportdistanzen, Transportzeiten, Transportkosten, Emissionen) im SD-Modell. [160, 161, 163, 164] Demzufolge handelt es sich dabei um Verkehrskenngrößen, die mittels der MVS erhoben werden.

In der Abbildung 5.18 wird aufgezeigt, welche Parameter entweder vom SD-Modell zur MVS (in orange markiert) oder von der MVS zum SD-Modell (in blau markiert) transferiert werden. Wie bereits bei der Formalisierung des SD-Modells (siehe Kapitel 5.1) erwähnt wurde, werden auch in diesem Kapitel die zu transferierenden Parameter im Text durch die o. g. Einfärbung kenntlich gemacht.

Die Datenaufbereitung für den Transfer stellt insofern eine Herausforderung dar, da nicht nur mit verschiedenen Zeiteinheiten jeweils im SD-Modell und in der MVS gerechnet wird, sondern auch mit verschiedenen Längeneinheiten.

5.3.1. Aggregation

Zunächst werden die ausgewerteten Daten der MVS für den Transfer zum SD-Modell aufbereitet. Dieser Schritt erfolgt in der Schnittstelle Aggregation des entwickelten Kopplungsansatzes. Zu diesem Zweck müssen Anpassungen in der Datenstruktur vorgenommen werden. Dabei handelt es sich um die Werte der Variablen Transportdistanz pro Tour $\bar{d}_{T,MVS}$, durchschnittliche Stoppdauer $\bar{t}_{st,MVS}$ und Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v}_{MVS} (siehe Formeln (5.113), (5.114), (5.115)).

$$\bar{d}_T = \frac{\bar{d}_{T,MVS}}{1000} \quad (5.113)$$

wobei

$$\begin{aligned} \bar{d}_T &= \text{Transportdistanz pro Tour [km/F]} \\ \bar{d}_{T,MVS} &= \text{Transportdistanz pro Tour [m/F]} \end{aligned}$$

$$\bar{t}_{st} = \frac{\bar{t}_{st,MVS}}{3600} \quad (5.114)$$

wobei

$$\begin{aligned} \bar{t}_{st} &= \text{Durchschnittliche Stoppdauer [h/St]} \\ \bar{t}_{st,MVS} &= \text{Durchschnittliche Stoppdauer [s/St]} \end{aligned}$$

$$\bar{v} = \bar{v}_{MVS} \cdot 3,6 \quad (5.115)$$

wobei

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \text{Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h]} \\ \bar{v}_{MVS} &= \text{Durchschnittsgeschwindigkeit [m/s]} \end{aligned}$$

Die in der MVS berechneten Werte der Variablen Sendungen pro Tour $\bar{s}_{p,T,MVS}$, $\bar{s}_{o,T,MVS}$ und Dropfaktor $\bar{\beta}_{MVS}$ können ohne Umrechnung der Dimensionen an das SD-Modell transferiert werden. Dasselbe gilt für die berechnete Güterverkehrsnachfrage gvn_{MVS} in der MVS. Die Anzahl der notwendigen Fahrten zur Auslieferung der Kundenaufträge für einen typischen Tag, die in der MVS bestimmt werden, wird zur Anpassung des initialen Flottenbestands FB_I des nächsten Simulationsdurchlaufs im SD-Modell hinterlegt. Dazu ist eine Umrechnung nicht erforderlich.

5.3.2. Disaggregation

Im Folgenden wird die Datenaufbereitung der Werte der ausgewählten SD-Parameter zur Aktualisierung der MVS näher beschrieben. Dies wird in der Schnittstelle Disaggregation des entwickelten Kopplungsansatzes vorgenommen.

Um die synthetische Population hinsichtlich ihrer Gesamtanzahl fortzuschreiben sowie die Alterung der Bevölkerung in der MVS zu erlauben, wird die Anzahl der Bevölkerung je Alterskohorte b_i , die bereits in Tabelle 5.2 definiert und im SD-Modell (siehe Gleichung (5.9)) berechnet wurde, vom SD-Modell zur MVS transferiert. Hierbei wird ein Abgleich zwischen der Anzahl der jeweiligen Alterskohorten in der MVS und der des SD-Modells vorgenommen.

$$b_{i,akt} = b_{i,neu} - b_{i,alt} \quad (5.116)$$

wobei

$b_{i,akt}$ = Bevölkerung je Alterskohorte der aktuellen Periode [KI]

$b_{i,neu}$ = Bevölkerung je Alterskohorte vom SD-Modell [KI]

$b_{i,alt}$ = Bevölkerung je Alterskohorte der letzten Periode [KI]

Um die potentiellen Privatkunden des KEP-Dienstleisters je Alterskohorte fortzuschreiben, wird die Anzahl der Bevölkerung je Alterskohorte b_i mit dem Anteil am E-Commerce je Alterskohorte $\alpha_{EC,i}$ multipliziert.

$$n_{EC,i} = b_i \alpha_{EC,i} \quad (5.117)$$

wobei

$n_{EC,i}$ = Potentielle Privatkunden der KEP-Dienstleister je Alterskohorte [KI]

$\alpha_{EC,i}$ = Anteil am E-Commerce je Alterskohorte [%]

Danach erfolgt wie bereits in der Formel (5.116) ein Abgleich der alten mit der neuen Anzahl der potentiellen Kunden zur Fortschreibung von $n_{EC,i}$. Dasselbe Vorgehen gilt für den Flottenbestand des KEP-Dienstleisters fb . fb wird in diesem Zuge an n_{DZ} Distributionszentren der KEP-Dienstleister gleichverteilt.

$$fb_{CEP,i} = \frac{fb}{n_{DZ}} \quad (5.118)$$

wobei

$fb_{CEP,i}$ = Flottenbestand pro Distributionszentrum [F/DZ]

n_{DZ} = Anzahl der Distributionszentren der KEP-Dienstleister insgesamt [DZ]

Die private gn_p und gewerbliche Güternachfrage gn_o , die im SD-Modell jeweils in 1-Jahres-Werten berechnet werden, muss hierbei in 1-Tageswerte disaggregiert werden. Diese Tageswerte beziehen sich auf einen typischen Geschäftstag eines KEP-Dienstleisters. (siehe Formel 5.119)

$$gn_{i,MVS} = \frac{gn_i}{n_{GT}} \quad (5.119)$$

wobei

$gn_{i,MVS}$ = Güternachfrage [PE/d]

gn_i = Güternachfrage [PE/a]

n_{GT} = Anzahl der Geschäftstage pro Jahr [d/a]

Um die fahrzeugspezifischen Charakteristika je Fahrzeugtyp in Jsprit anzupassen, werden die vom SD-Modell berechneten mittleren Fixkosten je LKW CF_{LKW} , die variablen Kosten je km $c_{L,km}$ und die Personalkosten pro Stunde pk_h an die MVS transferiert.

5. Formalisierung des Kopplungsansatzes

Vor der Parametrisierung dieser Charakteristika ist eine Umwandlung der Werte in andere Dimensionen notwendig (siehe Formalisierungen (5.120), (5.121) und (5.122)).

$$c_{F,LKW,MVS} = \frac{c_{F,LKW}}{n_{GT}} \quad (5.120)$$

wobei

$$\begin{aligned} c_{F,LKW,MVS} &= \text{Fixe Transportkosten pro LKW und Tag [€/F]} \\ c_{F,LKW} &= \text{Fixe Transportkosten pro LKW und Jahr [€/F]} \end{aligned}$$

$$c_{L,m,MVS} = \frac{c_{L,km}}{1000} \quad (5.121)$$

wobei

$$\begin{aligned} c_{L,m,MVS} &= \text{Variable Transportkosten pro Meter [€/m]} \\ c_{L,km} &= \text{Variable Transportkosten pro Kilometer [€/km]} \end{aligned}$$

$$pk_{s,MVS} = \frac{pk_h}{3600} \quad (5.122)$$

wobei

$$\begin{aligned} pk_{s,MVS} &= \text{Personalkosten pro Sekunde [€/s]} \\ pk_h &= \text{Personalkosten pro Stunde [€/h]} \end{aligned}$$

Auch der Kraftstoff- $\bar{k}v_{km}$ und Adblueverbrauch pro km $\bar{a}v_{km}$ des SD-Modells wird zur Aktualisierung dieser fahrzeugspezifischen Charakteristika in der MVS verwendet. Hierbei ist eine Umrechnung in eine andere Dimension notwendig. Die Gleichung (5.123) gilt sowohl für die Umrechnung von $\bar{k}v_{km}$ als auch von $\bar{a}v_{km}$.

$$\bar{k}v_{m,MVS} = \frac{\bar{k}v_{km}}{1000} \quad (5.123)$$

wobei

$$\begin{aligned} \bar{k}v_{m,MVS} &= \text{Kraftstoffverbrauch pro Meter [l/m]} \\ \bar{k}v_{km} &= \text{Kraftstoffverbrauch pro Kilometer [l/km]} \end{aligned}$$

Zur Berechnung der Emissionen $e_{i,MVS}$ CO, PM₁₀, HC und NO_x in der MVS werden die berechneten Werte der jeweiligen Konversionsfaktoren $\beta_{i,a}$ vom SD-Modell herangezogen und in andere Dimensionen umgerechnet (siehe Formel (5.124)). Da die CO₂ Konversionsfaktoren konstante Werte im SD-Modell sind, werden sie somit nicht zur Aktualisierung der MVS verwendet.

$$\beta_{i,a,MVS} = \frac{\beta_{i,a}}{1000} \quad (5.124)$$

wobei

$$\begin{aligned} \beta_{i,a,MVS} &= \text{Konversionsfaktor des Emissionstyps } i \text{ je Antriebsform } a \text{ pro Meter [g/m]} \\ \beta_{i,a} &= \text{Konversionsfaktor des Emissionstyps } i \text{ je Antriebsform } a \text{ pro Kilometer [g/km]} \end{aligned}$$

6. Parametrisierung des Kopplungsansatzes

In diesem Abschnitt wird der Kopplungsansatz parametrisiert. In diesem Fallbeispiel wird als konkreter Untersuchungsraum die Stadt Berlin ausgewählt. Aufgrund dessen wird das SD-Modell mit aggregierten Daten, die MVS dagegen mit disaggregierten Daten zum ausgewählten Untersuchungsraum soweit wie möglich parametrisiert. Sofern die Werte für spezifische Parameter für Berlin nicht vorlagen, wurden entweder Werte für Deutschland oder allgemeingültige Werte aus repräsentativen und empirisch fundierten Untersuchungen verwendet.

6.1. SD-Modell

In diesem Abschnitt erfolgt die Parametrisierung des SD-Modells für das Fallbeispiel Berlin.

6.1.1. Bevölkerung

Zur Parametrisierung dieses Teilmoduls wurden die Datenquellen vom Statistikamt Berlin-Brandenburg [2] verwendet.

Die Daten wurden von den Einwohnermeldeämtern in Berlin erhoben und vom Statistikamt Berlin-Brandenburg aufbereitet. Der Bevölkerungsstand, Geburten, Sterbefälle sowie die Anzahl der Ein- und Auswanderer liegt in absoluten Zahlen für die Jahre 2005 bis 2015 vor. Diese Parameter sind nach dem jeweiligen Alter in 1-Jahres-Kohorten von *Alterskohorten unter 1 Jahr bis 95 Jahre und älter* differenziert. Dies entspricht demnach 96 Alterskohorten. Erhebungstichtag war dabei der 31.12. des jeweiligen Jahres.

Wie bereits in Tabelle 5.2 aufgezeigt, wurden für diesen Ansatz 19 Alterskohorten gewählt. Die zuvor erwähnten Parameter wurden jeweils zu diesem Zweck zu den definierten Altersklassen je Erhebungsjahr akkumuliert bzw. zusammengefasst. Da die Startwerte des Gesamtmodells auf das Jahr 2009 festgelegt wurden, wurde die jeweilige absolute Anzahl der Alterskohorten vom Jahr 2009 zur Parametrisierung genutzt.

Die Entwicklungsraten $\rho_{R,i}$ (u. a. Geburten-, Mortalitäts-, Immigrations- und Emigrationsraten) pro Alterskohorte i und Jahr werden zunächst folgendermaßen berechnet. R steht dabei für die Parameter Geburten, Sterbefälle, Immigration und Emigration.

$$\rho_{R,i} = \frac{R_i}{B_i} \quad (6.1)$$

wobei

$\rho_{R,i}$ = Entwicklungsrate je Parameter R nach Alterskohorten und Jahr [%/a]

R_i = Parameter R je Alterskohorte i [N/a]

Hierbei werden die Datengrundlagen von 2005 bis 2015 herangezogen. Mit den Entwicklungsraten eines längeren Zeithorizonts wird die Grundlage für eine realistischere Trendprognose geschaffen. Zur Ableitung der mittleren Entwicklungsraten der Geburten, Sterbefälle, Immigration und Emigration $\bar{\rho}_{R,i}$ von 2005 bis 2015 wird jeweils der Mittelwert der einzelnen Raten dieses Zeithorizonts gebildet. Basierend auf diesen aufbereiteten Daten wurde das Submodul Bevölkerungsentwicklung parametrisiert.

In der Tabelle A.1 wird die Charakterisierung der Zustandsvariablen (Z) und Konstanten (K) nach ihren Variablennamen (P), Variablentypen (T), initialen Werten (IW), der jeweiligen Einheit (U) und der Datenquellen (Q) aufgezeigt.

6.1.2. Güternachfrage

Zur Parametrisierung dieses Submoduls werden die Datenquellen vom Statistikamt Berlin-Brandenburg [3], von Esser und Kurte [40, 41] sowie von Manner-Romberg et al. [100] herangezogen.

Die Güternachfrage der privaten und gewerblichen Kunden GNK_i können den Arbeiten von Esser und Kurte [40, 41] entnommen werden. Diese Zahlen liegen für die Jahre 2009 bis 2015 vor. Aufgrund dieser Datenbasis wurden die Startwerte des Gesamtmodells auf das Jahr 2009 festgelegt.

Esser und Kurte [40, 41] stellen den KEP-Index Haushalte, die Güternachfrage pro Privathaushalt und Jahr, im KEP-Bereich für Deutschland zur Verfügung. Dabei fassen sie die Nachfragesegmente B2C und C2C zusammen und leiten daraus das Sendungsaufkommen (Anzahl der Sendungen) je Haushalt und Jahr ab. Grundlage für ihre Berechnungen stellt die BEVH-Studie zur Verfügung.

Die Veränderungsraten der privaten Güternachfrage $\rho_{GNK,p}$ im Vergleich zum Vorjahr werden zunächst pro Jahr eigens berechnet. Die Veränderungsrate $\rho_{GNK,p}$ in Prozent pro Jahr werden für den Zeitpunkt $t + 1$ im Vergleich zum Zeitpunkt t abgeleitet.

$$\rho_{GNK,p}(t + 1) = \frac{GNK_p(t + 1)}{GNK_p(t)} - 1 \quad (6.2)$$

Auch Manner-Romberg et al. [100] nutzen als Datenbasis die BEVH-Datenbank und berechnen das Sendungsaufkommen pro Kopf für ausgewählte Städte in Deutschland. Hierbei betrachten sie das Gesamtsendungsaufkommen in Paketeinheiten und die Gesamtbevölkerung je Untersuchungsraum. Aus dem Quotienten des Gesamtsendungsaufkommens und der Gesamtbevölkerung leiten sie die nachgefragten Pakete pro Privatperson ab. Für Berlin wurde ein Pro-Kopf-Paketaufkommen von 13 Paketen pro Person für das Jahr 2014 bestimmt.

Da in diesem Modell die private Güternachfrage für Privatpersonen und nicht für Haushalte für den Untersuchungsraum Berlin berechnet werden soll, wird zu diesem Zweck $\rho_{GNK,p}$ für den Zeitraum 2009 bis 2015 bestimmt. Dazu müssen die ausgewählten Daten [40, 41, 100] aufbereitet werden. Mittels der berechneten Entwicklungsraten $\rho_{GNK,p}(t+1)$ der Güternachfrage privater Haushalte für Deutschland und des ausgewiesenen Wertes von 13 Paketen pro Kopf in Berlin im Jahr 2014 [100] gelingt eine Bestimmung der privaten Güternachfrage pro Kopf für Berlin. Startwert für die folgende Berechnung bilden die 13 Pakete pro Kopf für das Jahr 2014.

$$GNK_p(t+1) = GNK_p(t) + GNK_p(t) \rho_{GNK,p}(t+1) \quad (6.3)$$

$$GNK_p(t-1) = GNK_p(t) - GNK_p(t) \rho_{GNK,p}(t) \quad (6.4)$$

Mittels dieser Formalisierungen kann die Güternachfrage pro Kopf für Berlin für die Jahre 2009 bis 2015 berechnet werden. Mit der Formel (6.3) wird der Wert für 2015 abgeleitet und mit der Gleichung (6.4) können die Werte von 2009 bis 2013 bestimmt werden.

Der KEP-Index der Unternehmen bzw. die gewerbliche Güternachfrage GNK_o wird von Esser und Kurte [40, 41] für den Zeitraum von 2009 bis 2015 in Anzahl der Sendungen im B2B-Segment je Million € des Bruttoinlandsprodukts (BIP) ausgewiesen. Die Veränderungsrate pro Jahr der gewerblichen Güternachfrage $\rho_{GNK,o}$ werden auch nach der Formel (6.2) berechnet.

Zur Ableitung der mittleren Veränderungsrate der privaten und gewerblichen Güternachfrage $\bar{\rho}_{GNK,i}$ von 2009 bis 2015 wird jeweils der Mittelwert der einzelnen Raten dieses Zeithorizonts gebildet.

Da das Sendungsaufkommen im B2B-Segment GNK_o pro Mio. € BIP von Esser und Kurte [40, 41] berechnet wurde, wurde für die vorliegende Arbeit das BIP in Mio. € vom Statistikamt Berlin-Brandenburg [3] für die Jahre 2009 bis 2015 herangezogen. Die Veränderungsrate des BIP ρ_{BIP} werden auch nach der Formalisierung (6.2) berechnet. Die mittlere Veränderungsrate $\bar{\rho}_{BIP}$ ergibt sich aus dem Mittelwert der Veränderungsrate von 2009 bis 2015.

Basierend auf diesen aufbereiteten Daten wurde das Submodul Güternachfrageentwicklung parametrisiert (siehe Tabelle A.2). Die Startwerte für GNK_p , GNK_o und BIP sind jeweils vom Jahr 2009. Die Entwicklungsraten $\rho_{GNK,p}$, $\rho_{GNK,o}$ und ρ_{BIP} sind die mittleren Veränderungsrate von 2009 bis 2015.

6.1.3. Güterverkehrsnachfrage und -kapazität

Um dieses Teilmodul zu parametrisieren, werden die Startwerte der privaten und gewerblichen Güternachfrage GNK_i von 2009 herangezogen (siehe Tabelle A.2). Damit kann einerseits die private Güternachfrage gn_p und andererseits die gewerbliche Güternachfrage gn_o berechnet werden.

$$gn_p = GNK_p b \quad (6.5)$$

$$gn_o = GNK_o BIP \quad (6.6)$$

Durch die Aufsummierung von gn_p und gn_o wird das Gesamtendungsaufkommen in Paketeinheiten für das Jahr 2009 kalkuliert. Damit liegt der Startwert für den Auftragsbestand des KEP-Dienstleisters A vor.

Der Wert der Konstanten Anzahl der Geschäftstage n_{GT} ist ein Mittelwert der Geschäftstage in Berlin der Jahre 2009 bis 2100. Diese wurden der Sekundärdatenquelle von Schulz [141] entnommen.

Nach Moder [109] bemisst sich der Zeitaufwand für Instandhaltung und Reparatur durch die Werkstatt- und Ausfalltage je KEP-Fahrzeug und Jahr. Dieser Wert wird von Moder [109] zur Parametrisierung herangezogen.

In der Tabelle A.3 werden die parametrisierten Zustandsvariablen und Konstanten dieses Submoduls aufgezeigt.

6.1.4. Laufleistung und Kraftstoffverbrauch

Zur Parametrisierung dieses Teils des SD-Modells wird die durchschnittliche Nutzungsdauer t_{ND} der Fahrzeuge berechnet. Einerseits wurde dieser Durchschnittswert aus der Datenquelle ETM [43] entnommen. Es handelt sich dabei um technische Daten und Transportkosten von zwei typischen Lastfahrzeugen, die im KEP-Verkehr in urbanen Räumen eingesetzt werden. Die Daten beziehen sich dementsprechend auf die zwei Transporter bis 3,5 Tonnen zul. GG. Mercedes Sprinter 316 CDI (Hochkasten, lang) und Iveco Eco Daily 35C 17HV (Hochkasten, lang). Diese Datenbasis beinhaltet u. a. Angaben zur kalkulatorischen Nutzungsdauer, die für diese Fahrzeuge 48 bis 72 Monate beträgt. Zunächst wurde jedoch im Modell dieser Parameter intern berechnet.

$$t_{ND} = \frac{\sum_{i=1}^6 (R_{FB,q} a_{FB,q}) + R_{VL}}{r_{fb}} \quad (6.7)$$

wobei

$R_{FB,q}$ = Flottenabnahme je Fahrzeugkohorte q [F/a]

$a_{FB,q}$ = Alter je Fahrzeugkohorte q [a]

R_{VL} = Verkaufte LKW [F/a]

r_{fb} = Gesamtflottenabnahme [F/a]

Hierbei wurde mittels Simulationsläufen beobachtet, dass sich dieser Wert von 2009 bis 2100 nur geringfügig verändert. Dieser liegt im Durchschnitt zwischen 5,8 und 5,9 Jahren. Aufgrund dessen wurde festgelegt, diesen Parameter als Konstante einzuführen. Aus den berechneten Werten wurde der Mittelwert für t_{ND} gebildet.

Die jeweiligen Anteile der LKW nach Euroklassen $\alpha_{fb,j}$ basieren auf der Datenbank des Handbuchs Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) [71]. Diese Datenbank umfasst historische Werte und Prognosen von 1994 bis 2030. Sie enthält Informationen zu den folgenden Bereichen, die dementsprechend differenziert werden.

- Fahrzeugtypen im MIV und GV
- Emissionen
- Verkehrssituation
- Raumtypen
- Straßentypen
- Verkehrsstauniveau
- Antriebsformen der Fahrzeuge
- Emissionsklassen der Fahrzeuge
- Kraftstoffverbrauch
- Durchschnittlich zurückgelegte Kilometer der Fahrzeuge
- Geschwindigkeit
- Anteil der Fahrzeugtypen
- Konversionsfaktoren der Emissionen

Für die vorliegende Arbeit dient die Datenbank zur Berechnung der jeweiligen Anteile der Fahrzeugtypen nach Emissionsklassen sowie der Konversionsfaktoren je Emissionstyp und Emissionsklasse. Um nun die jeweiligen Anteile der LKW nach Emissionsklassen $\alpha_{fb,j}$ aus dieser Datenbank zu berechnen, wurden folgende Rahmenbedingungen bestimmt. Es wurden die Daten für Agglomerationsräume, in Erschließungsgebieten mit Tempolimit 50 km/h und einer gesättigten Verkehrssituation selektiert. Grund dafür ist der Bezug zur Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} von 27,06 km/h, die für diesen Raumtyp ausgewiesen wird. Im Vergleich dazu liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit in Berlin nach Forbes [111] bei 24,1402 km/h. Von Interesse waren in diesem Kontext leichte Nutzfahrzeuge mit Dieselantrieben. Hierbei wird angenommen, dass im Güterverkehr hauptsächlich Dieselfahrzeuge eingesetzt werden. Diese haben ein Leergewicht von bis zu 1760 kg. Die Anteile der LKW α_{fb} , differenziert nach den Emissionsklassen j bzw. EURO 1 bis 6, werden als Graph $G_{\alpha_{fb,j}}$ für den Zeitraum von 2009 bis 2030 angegeben (siehe Tabelle A.5). Grund dafür ist, dass bei der Auswertung der Daten kein linearer Verlauf der Entwicklung der verschiedenen Emissionsklassen erkennbar war. Deswegen war es nicht möglich, mittlere Anteile für den Zeitraum von 2009 bis 2030 anzunehmen. Dabei wurden die EURO 0-Fahrzeuge nicht betrachtet, da sie nur einen mittleren Anteil von 0,7 Prozent im Zeitraum von 2009 bis 2030 einnehmen. 2009 sind noch 2,85 Prozent dieser Fahrzeuge am Gesamtgüterverkehrsaufkommen auf der Straße. Für 2024 wird nur noch ein Anteil von 0,18 Prozent prognostiziert, der nach 2024 auf 0 Prozent sinkt.

Der Kraftstoffverbrauch LKW pro km voll $k_{v_{km,voll,j}}$ und leer $k_{v_{km,leer,j}}$ der Emissionsklassen 3–6 können den Berechnungen der Verkehrsrundschau [89] entnommen werden. Diese führen eigene LKW-Tests zwischen 1999 bis 2009 durch und weisen den Energieverbrauch in Liter Diesel je 100 km differenziert nach Fahrzeugtypen und Emissionsklassen aus. Zusätzlich haben sie die Fahrzeuge auf fahrzeugtypspezifischen Einsatzgebieten getestet. Dies bedeutet, dass für Transporter (3,5 t zul. GG.) der Fahrtenanteil in Städten signifikant stärker als der Autobahnanteil im Test ausfiel. Die Angaben zur Emissionsklasse EURO 6 entstammen einer Teststudie mit zwei Fahrzeugen, die 2014 von der Verkehrsrundschau durchgeführt wurde [89, S. 31]. Hierbei ist hervorzuheben, dass die spezifische KEP-Fahrweise mit häufigen Stopps und Anfahren nicht untersucht wurde. Diese Analyse fand unter realen Bedingungen und nicht im Labor statt. Für die Arbeit werden die Werte des Kraftstoffverbrauchs von Transportern mit 3,5 t Gesamtgewicht und Dieselantrieb verwendet. Die Parameter $k_{v_{km,voll,j}}$ und $k_{v_{km,leer,j}}$ für die Emissionsklassen 1–2 liegen dieser Datenquelle jedoch nicht vor. Zu diesem Zweck wurden eigene Berechnungen vorgenommen.

Mittels dieser aufbereiteten Daten wird dieses Teilmodul parametrisiert (siehe Tabelle A.4). In der Tabelle A.5 werden die Anteile der LKW-Fahrzeugtypen nach Emissionsklassen EURO 1 bis 6 nach HBEFA [71] für den Zeitraum von 2009 bis 2030 präsentiert.

6.1.5. Flottenbestand

Zur Parametrisierung dieses Teilmoduls wird in diesem Abschnitt die Aufbereitung der verwendeten Datenquellen zu den Verschrottungsraten $\rho_{s,q}$ und Flottenbeständen FB_q je Alterskohorte q aufgezeigt.

Das Institut für angewandte Ökologie [103] berechnet für das Jahr 2007 Verschrottungsraten leichter Nutzfahrzeuge (bis 3,5 t zul. GG) in Deutschland. Dabei unterteilen sie diese Raten nach dem Alter der Fahrzeuge. Als Grundlage ziehen sie die Datenbank des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) zu den Fahrzeugbeständen heran. Da der Flottenbestand in diesem Modell aus 6 Alterskohorten besteht, werden für die 6 Altersklassen die jeweiligen Verschrottungsraten $\rho_{s,q}$ aus den Modellergebnissen vom Institut für angewandte Ökologie [103] entnommen.

$$\rho_{s,q} = \frac{FB_q - (FB_q - FB_{exp,q})}{FB_q} \quad (6.8)$$

Das Institut für angewandte Ökologie [103] verwendet zur Berechnung der jeweiligen Verschrottungsrate $\rho_{s,q}$ je Alterskohorte q die tatsächlichen Fahrzeugsbestände FB_q der Altersklassen q für das Jahr 2007 von der KBA-Datenbank. Darüber hinaus werden die exportierten Fahrzeugbestände zwischen 2007 und 2008 $FB_{exp,q}$ je Alterskohorte q berücksichtigt. Damit gelingt die Ableitung der tatsächlichen Verschrottungsrate zwischen 2007 und 2008 je Alterskohorte.

Zur Berechnung des Initialwertes für den Flottenbestand FB_I wird zunächst der berechnete Initialwert für den Auftragsbestand des KEP-Dienstleisters A (vgl. Tabelle A.3) und der eigens berechnete Durchschnittswert für die durchschnittlichen Sendungen pro

Tour s_T von 154,45 nach Bogdanski [17] (vgl. Tabelle A.7) zur Ableitung der Fahrten pro Jahr bzw. der Güterverkehrsnachfrage gvn herangezogen.

$$gvn = \frac{A}{s_T} \quad (6.9)$$

Da es sich dabei um das Fahrtenaufkommen pro Jahr handelt, wird gvn ins Verhältnis zu den Geschäftstagen pro Jahr n_{GT} gesetzt, um die eingesetzten Fahrzeuge pro Geschäftstag FB_I zu berechnen – mit der Annahme, dass ein KEP-Fahrzeug eine Tour pro Tag durchführt.

$$FB_I = \frac{gvn}{n_{GT}} \quad (6.10)$$

Dieser Initialwert wird für das Jahr 2009 bestimmt.

Um nun den Fahrzeugbestand FB_q je Alterskohorte q zu berechnen, wird FB_I zu den 6 Alterskohorten ins Verhältnis gesetzt.

Im Detail werden die parametrisierten Zustandsvariablen und Konstanten dieses Submoduls in der Tabelle A.6 charakterisiert.

6.1.6. Tourencharakteristika und Transportzeit

Zur Berechnung der fahrtenspezifischen Kennzahlen d_T und s_T sowie β_p und β_o werden die Studien von Bogdanski [16, 17] herangezogen.

Im Auftrag des Bundesverbands Paket und Expresslogistik (BIEK) e. V. erhebt Bogdanski [16] die Fahrtenkennzahlen des KEP-Verkehrs auf der Letzten Meile in den Stadtgebieten von Nürnberg und Frankfurt am Main und veröffentlicht Durchschnittswerte für das Jahr 2015. Die Daten resultieren aus einer Befragung von KEP-Diensten für diese Untersuchungsräume. Die Werte von Nürnberg beinhalten keine Aussagen von GO!, dagegen fehlen die Werte von GLS und GO! zum Untersuchungsraum Frankfurt am Main. Hierbei wurden nur Mitglieder der BIEK befragt (u. a. DPD, GO!, TNT, FedEx, Hermes, UPS, trans-o-flex, Sovereign). Die Deutsche Post DHL wird dabei nicht berücksichtigt.

In einer weiteren Studie 2017 untersucht Bogdanski [17] die drei Großstädte Berlin, Hamburg und München. Er führt eine Befragung der marktführenden KEP-Dienstleister durch. DHL nimmt nicht an dieser Umfrage teil. Daher validiert er seine Annahmen und eigenen Berechnungsmodelle mittels vorhandener DHL-Daten aus Nürnberg und Frankfurt.

Bogdanski postuliert für seine Studien, dass seine Ergebnisse repräsentativ und auf andere Städte übertragbar sind. Er weist darauf hin, dass die städtischen Strukturen deutscher Großstädte miteinander vergleichbar sind. Aufgrund dessen sind die Ergebnisse auf andere Städte übertragbar [16, 17].

Aus den jeweiligen Werten für β_p von Nürnberg und Frankfurt am Main wird der Mittelwert gebildet. Sie weisen Stoppfaktoren für die Nachfragesegmente B2B, B2C und C2C aus. Die Stoppfaktoren für B2C und C2C β_p liegen jeweils zwischen 1,1 und 1,2 Paketen pro Stopp. Dagegen liegt der Stoppfaktor für B2B β_o zwischen 2,0 und 3,0 bei einer

Erstzustellungsquote von 100 Prozent. Aus diesen Angaben zu β_p und β_o wurde jeweils der Mittelwert gebildet. [16]

Bogdanski [17, S. 15] beschreibt explizit die durchschnittlichen Tourenlängen d_T für den Untersuchungsraum Berlin. Hierbei unterscheidet er die drei folgenden Tourenklassen T_i und gibt zusätzlich die jeweiligen Anteile dieser $\alpha_{T,i}$ an der Gesamtanzahl der Touren an.

- 53 %: Klasse A bis 50 km
- 37 %: Klasse B bis 60 bis 80 km
- 10 %: Klasse C von 90 bis 130 km

Für die vorliegende Arbeit lässt sich daraus die durchschnittliche Transportdistanz pro Tour d_T der drei Tourenklassen berechnen.

$$d_T = \sum_{i=1}^n \bar{d}_{T_i} \alpha_{T,i} = 50km \cdot 0,53 + 70km \cdot 0,37 + 110km \cdot 0,1 = 63,4km \quad (6.11)$$

Dementsprechend ergibt sich eine durchschnittliche Transportdistanz pro Tour für Berlin von 63,4 km.

Ferner erhebt er die Sendungen pro Tour s_T je Tourenklasse T_i [17, S. 15]. Auch in diesem Fall wird eigens ein Durchschnittswert der drei Tourenklassen berechnet.

$$s_T = \sum_{i=1}^n \bar{s}_{T_i} \alpha_{T,i} = 163[PE/F] \cdot 0,53 + 148[PE/F] \cdot 0,37 + 133[PE/F] \cdot 0,1 \quad (6.12)$$

$$= 154,45[PE/F] \quad (6.13)$$

Die weiteren erhobenen Kennzahlen zum KEP-Verkehr in Berlin, u. a. zugestellte Pakete, Zustellfahrzeuge, Touren pro Werktag sowie Stoppzahl pro Tour und Werktag für das Jahr 2016 können zur Validierung der Simulationsergebnisse der vorliegenden Arbeit Verwendung finden.

Bezogen auf die durchschnittliche Stoppdauer \bar{t}_{st} untersucht Moder [109] die Stopzeit pro Sendungsabgabe bei der Standard-Heimlieferung. Die Übergabedauer (inkl. Fußweg) beträgt ca. 2,5 Minuten pro Sendung in Agglomerationsräumen bei einer Standard-Heimlieferung. Schließfachsysteme, Pick-Up-Points und Boxen am Haus haben dagegen eine geringere Übergabedauer. Je nach Raum kann diese Zeit stark variieren. Der Wert bezieht sich zudem nicht direkt auf Berlin, sondern ist allgemeingültig. 2,5 Minuten pro Sendung sind zu viel, sollten pro Stopp 5 Pakete ausgeliefert werden. Die Stopzeit würde sich nicht verfünffachen, da beispielsweise der Fußweg nur einmal zurückgelegt werden muss. Daher wird in diesem Modell eine Stopzeit von 2,5 Minuten unabhängig von der Sendungsanzahl angenommen. Zur Parametrisierung werden die Minutenangaben von \bar{t}_{st} in Stunden umgerechnet.

Zur Parametrisierung der Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} wurde die Datenquelle Forbes [111] herangezogen. Diese stellt eine Rangliste der „langsamsten“ Städte Europas für das Jahr 2007 auf. Die Studie basiert auf der Analyse der Autogeswindigkeit innerhalb eines knapp 16 Quadratkilometer großen Gebiets im Zentrum der Städte. Untersucht wurden die 30 „langsamsten“ Städte Europas anhand von GPS-Daten, die zwischen Juni und September 2007 erhoben wurden. Dabei liegt Berlin in der Rangliste auf Platz 2 hinter London. Die Durchschnittsgeschwindigkeit wird hierbei in Meilen pro Stunde [mph] angegeben. Der Faktor 1,609344 wird zur Umrechnung von mph in km/h verwendet. Für Berlin ist es notwendig, \bar{v} von 15 mph mit diesem Umrechnungsfaktor zu multiplizieren, um die Durchschnittsgeschwindigkeit von 24,14 km/h zu berechnen.

In der Tabelle A.7 werden die parametrisierten Konstanten dieses Submoduls angezeigt.

6.1.7. Transportkosten

Die einzelnen Kostenbestandteile dieses Submoduls werden mit den durchschnittlichen Kosten des ausgewählten LKW-Typs, der üblicherweise von den KEP-Dienstleistern genutzt wird, parametrisiert. Dabei handelt es sich um leichte Nutzfahrzeuge bis 3,5 t zul. GG. (u. a. Mercedes Sprinter 316 CDI Hochkasten, lang und Iveco Eco Daily 35C 17HV Hochkasten, lang). [43]

Der Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V. stellt die Kostenentwicklung im Güterkraftverkehr differenziert nach nationalem Fern-, Regional- und Nahverkehr sowie betriebsindividueller Kostenstruktur für den Zeitraum von Januar 2010 bis September 2016 zur Verfügung. Sie differenzieren zwischen den Kostengruppen Personalkosten, Fahrerspesen, Fahrzeugeinsatzkosten (km-abhängige Leistungskosten), Fahrzeugvorhaltekosten (Fixkosten) und Verwaltungskosten (Gemeinkosten). Die einzelnen Kostenarten dieser Gruppen werden zudem im Detail untergliedert. Dazu wird je nach betrachteten Zeitintervall die Veränderungsrate zum Vorjahr in Prozent für jede Kostenart, die zusammengefasste Kostengruppe und die Gesamtkosten ausgegeben. Für die vorliegende Arbeit wurde die Kostenentwicklung des nationalen Nahverkehrs zwischen Januar 2010 und Dezember 2015 betrachtet. Die Daten werden in monatlichen Abständen aktualisiert. Hierbei ist die Kostenentwicklung im Nahverkehr von Interesse, der mit einem Radius von bis zu 50 km und einer Jahreslaufleistung von ca. 40.000 bis 50.000 km von der BGL [22] definiert wird. Für den Nahverkehr bestimmen sie weitere Modellannahmen zur Berechnung der Kostenstrukturen (siehe Tabelle 6.1). Eine Neuberechnung der Kostenstrukturen erfolgt alle fünf Jahre. Um die zeitliche Vergleichbarkeit zu gewährleisten, findet das Laspeyres-Konzept der amtlichen Statistik Anwendung. Das Kostenmodell der BGL [22] wurde mit den Daten vom Statistischen Bundesamt, BG Verkehr, AOK-Bundesverband GbR, AOK Hessen, BAG, Deutsche Bundesbank, DEKRA, Bundesministerium für Finanzen, KRAVAG und der Mannheimer Versicherung parametrisiert.

Tabelle 6.1.: Modellannahmen der BGL zur Berechnung der Transportkostenstrukturen (Eigene Darstellung nach [22]).

Modellannahmen für den Nahbereich	
Jahreslaufleistung	40.000 – 50.000 km
Anteil mautpflichtiger Kilometer	0 – 35 %
Fahrzeugeinsatzstunden	2.760 – 2.880 Std./Jahr
Faktor der Fahrpersonalbereitschaft	1,25 – 1,3
Fahrzeug-/Aufbauarten	Absetzkipper, 2-3 Achsen, 40 t zGG; Dreiseitenkipper Solo, 3 Achsen, 26 t zGG; LKW mit Kofferaufbau und Ladebordwand, 7,49 t zGG
Emissionsklasse	EURO 6
Kraftstoffverbrauch pro km	35/37/19 l/100km

Somit wurden die jährlichen Veränderungsrate der einzelnen Kostenarten erfasst. Diese dienen als Grundlage für die vorliegende Transportkostenberechnung. Die Veränderungsrate der Kostenbestandteile ρ_{AP} , ρ_{SC} , ρ_{IR} , ρ_{RP} , ρ_{LP} , ρ_{SO} und ρ_{PK} sind Mittelwerte der jährlichen Veränderungsrate von 2010 bis 2015. Die Veränderungsrate des Kaufpreises für 1 LKW ρ_{LP} ist im BGL-Datensatz als Veränderungsrate der zeitabhängigen Abschreibung definiert. [22]

Um die absoluten Werte der Transportkostenbestandteile zu berechnen, wird die Datenquelle ETM [43] herangezogen. Die Datenquelle beinhaltet nur für das Jahr 2015 technische Daten zu den zwei Fahrzeugen und die jeweiligen Kostenbestandteile der Gesamtkostenberechnung nach absoluten Werten. Zunächst werden für die absoluten Werte der Kostenbestandteile SC , RP , LP , IR , SV und SO zu den zwei Fahrzeugen die Mittelwerte berechnet.

Da diese Werte für 2015 gelten, können diese zur Parametrisierung des Modells als initiale Werte von 2009 nicht genutzt werden. Zu diesem Zweck werden basierend auf den Veränderungsrate der BGL [22] die absoluten Werte jeweils vom Ausgangsjahr 2015 bis 2009 zurückgerechnet.

Mittels der vorliegenden Veränderungsrate ρ_{TKB} der jeweiligen Kostenbestandteile der BGL [22] und der ausgewiesenen, absoluten Werte TKB der Kostenbestandteile im Jahr 2015 von ETM [43] gelingt eine Bestimmung der absoluten Werte pro Jahr für den Zeitraum von 2009 bis 2015.

$$TKB(t - 1) = TKB(t) - TKB(t) \rho_{TKB}(t) \quad (6.14)$$

Mittels der Formalisierung (6.14) können die Werte von 2009 bis 2014 bestimmt werden.

Die Kraftstoffpreise KP für den Zeitraum von 2009 bis 2015 sind den Daten des Mineralölwirtschaftsverbands (MWV) e.V. [108] entlehnt, der aktuelle Monatszahlen zu den Verbraucherpreisen für Mineralölprodukte veröffentlicht. Diese Daten basieren auf den Angaben vom Statistischen Bundesamt und liegen von 2005 bis 2016 vor. Der initia-

le Wert von KP stammt vom Januar 2009. Die Veränderungsrate des Kraftstoffpreises ρ_{KP} wurde folgendermaßen berechnet.

$$\rho_{KP}(t+1) = \frac{KP(t+1)}{KP(t)} - 1 \quad (6.15)$$

Die Leistungs- ρ_{LA} und Zeitabschreibungsrate ρ_{ZA} liegen nach Wittenbrink [173] jeweils bei 50 Prozent. Für den Nahverkehr wird vereinzelt ein höherer fixer Anteil gewählt. Unter Abschreibung wird in diesem Kontext eine Wertminderung verstanden, die sowohl von der Nutzungsdauer als auch von der Laufleistung abhängig ist.

Der prozentuale Restwert rw wird im vorliegenden Modell auf 30 Prozent in Anlehnung an die Deutsche Automobil Treuhand GmbH (DAT Group) [32] und Verkehrsrundschau [89] gesetzt. Dieser beträgt nach sechs Jahren Nutzungsdauer bei Nahverkehrsfahrzeugen ca. 30 bis 40 Prozent des Kaufpreises. Dabei sind wertbeeinflussende Faktoren (u. a. Serien-, Sonderausstattung, individueller Fahrzeugzustand) nicht berücksichtigt.

Die Veränderungsrate für die Personalkosten ρ_{PK} nach der BGL [22] dient als Basis zur Fortschreibung der absoluten Personalkosten pro Fahrer, die inkl. Sozialversicherungsbeitrag vorliegen. Während ein Fernverkehrsfahrer ca. 26.000 – 30.000 €/Jahr (Brutto) erhält, verdient ein Nahverkehrsfahrer ca. 21.000 – 24.000 €/Jahr (Brutto). Die Werte können jedoch je nach Region stark variieren. So sind die Fahrerkosten in Süddeutschland i. d. R. höher als in Norddeutschland bzw. in den neuen Bundesländern. Die für diese Arbeit berechneten PK pro Fahrer beinhalten bereits den Sozialversicherungsbeitrag, der einem Anteil von 25,745 Prozent am Bruttogehalt entspricht [173, 94f.].

Zur Berechnung der Gesamtpersonalkosten pro Jahr c_{PK} wird ein Personalfaktor β_{PF} berücksichtigt, der aufgrund von Arbeits-, Urlaubs- und Krankheitstagen entsteht. Dies bedeutet, dass die Anzahl des zu bezahlenden Personals nicht der Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge entspricht. Es kommt zu planbaren und nicht planbaren Ausfällen, die durch einen Überhang an Personal zu decken sind. Der Faktor liegt hierbei zwischen 1,2 und 1,4 Fahrer pro LKW. [173] Im Folgenden wird die Berechnung des Personalfaktors aufgezeigt.

$$\beta_{PF} = \frac{n_{GT} - t_{IR}}{n_{AT} - n_{UT} - n_{KT}} \quad (6.16)$$

wobei

- β_{PF} = Personalfaktor pro LKW [P/F]
- n_{AT} = Arbeitstage pro Person [d/(P*a)]
- n_{UT} = Urlaubstage pro Person [d/(P*a)]
- n_{KT} = Krankheitstage pro Person [d/(P*a)]

Für Berlin ergibt sich bei der mittleren Anzahl an Geschäftstagen n_{GT} von 304,78 Tagen, 3 Tagen für Instandhaltung und Wartung pro LKW t_{IR} sowie 253,35 Arbeits- n_{AT} , 30 Urlaubs- n_{UT} und 8 Krankheitstagen n_{KT} pro Person ein Personalfaktor von 1,401346645 Personen pro Fahrzeug, welcher im Modell auf 1,4 abgerundet wird. Die

Werte zu den Urlaubs- und Krankheitstagen stammen von Moder [109]. Für die Arbeitsstunden pro Tag h_{AS} wird angenommen, dass ein KEP-Fahrer an einem typischen Tag 8 Stunden arbeiten muss.

In der Tabelle A.8 wird die Charakterisierung und Parametrisierung der Zustandsvariablen und Konstanten dieses Submodul im Detail aufgezeigt.

6.1.8. Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage

Für dieses Teilmodul wird wie bereits in Kapitel 6.1.4, Seite 132 das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßengüterverkehrs [71] zur Bestimmung der Konversionsfaktoren $\beta_{i,j,a}$ je Emissionstyp i , Emissionsklasse j und Antriebsform a herangezogen.

Die durchschnittlichen Konversionsfaktoren $\beta_{i,j,a}$ werden jeweils für die Emissionstypen CO, PM₁₀, HC und NO_x berechnet. Dazu wird der Mittelwert von $\beta_{i,j,a}$ von 2009 bis 2030 gebildet.

Der ausgewiesene Wert von 2,63 kg/l für den CO₂ Konversionsfaktor für Diesel $\beta_{1,D}$ nach der Verkehrsrundschau [89] findet für die vorliegende Arbeit Verwendung. Zur Parametrisierung des CO₂ Konversionsfaktors für Adblue $\beta_{1,A}$ wird der Wert von 0,238 kg/l nach Kranke et al. [90] genutzt.

In der Tabelle A.9 werden die Konstanten dieses Teilmoduls nach ihren jeweiligen initialen Werten, der entsprechend verwendeten Sekundärdatenquellen, der Einheiten und ihres Variablentyps charakterisiert.

6.2. MVS

Im Folgenden wird die Parametrisierung der MVS, in diesem Fall MATSim, vorgenommen. Die Parametrisierung muss vornehmlich zur *Initialisierung der Welt und der Verkehrsnachfrage* durchgeführt werden. In der Abbildung 5.15 wird dieser Modellierungsprozess der MVS aufgezeigt.

Zunächst erfolgt der Aufbau der initialen Welt (u. a. Infrastruktur, Distributionszentren der KEP-Dienstleister, Packstationen, Paketshops, Standorte der Wirtschaftsunternehmen, Anzahl der Privatpersonen auf statistischer Blockebene). Die initiale Welt wurde nach den Vorgaben von Balmer et al. [8] und Schröder et al. [140] mittels eigener Sekundärdatenerhebungen aufgebaut und an die eigenen Anforderungen angepasst.

Danach werden die Attribute an die Standorte der Wirtschaftsakteure, der Privatpersonen und der Frachtführer mittels Georeferenzierung oder ausgewählter Verteilungsverfahren (u. a. Zufallsverteilung, Normalverteilung, Monte-Carlo-Simulation, Entropiemaximierung) zugeordnet und verteilt. In der vorliegenden Arbeit sind die Attribute der jeweiligen Standorte entweder im Vorfeld bekannt und werden über Georeferenzierung zugeordnet, oder sie werden mittels Zufallsverteilung an die einzelnen Agenten verteilt. Damit steht die initiale, synthetisch generierte Welt für Berlin für die Mikrosimulation bereit.

6.2.1. Infrastrukturnetzwerk und Standorte der Akteure

Zur Initialisierung der Welt muss das Infrastrukturnetzwerk aufgebaut sowie die konkreten Standorte der Akteure im System (u. a. KEP-Dienstleister, private und gewerbliche Kunden) erhoben werden.

Infrastruktur Das Infrastrukturnetzwerk von Berlin wird von Rieser [125] herangezogen. Darin wird jede Kante des Netzwerks nach ihrer Länge, maximalen Geschwindigkeit, Infrastrukturkapazität und Anzahl der Spuren definiert. Die Geokoordinaten der Knoten und Kanten des Netzwerks liegen im Gauß-Krüger-Koordinatensystem (GK4; EPSG:31464) vor. Für die vorliegende Arbeit werden die Geschwindigkeiten pro Kante im Netzwerk verändert. Forbes [111] bestimmen für Berlin eine Durchschnittsgeschwindigkeit auf dem Infrastrukturnetzwerk von 24,1402 km/h. Dementsprechend wird dieser Wert in Meter pro Sekunde umgerechnet und die Kanten im Netz auf 6,705611111 m/s gesetzt, um einen Widerstand im Netz bedingt durch den Personenverkehr zu erzeugen. Ausnahmen bilden die Kanten mit einer definierten Maximalgeschwindigkeit von 5, 10 und 20 km/h. Diese Geschwindigkeitsangaben werden nicht verändert. Ferner werden folgende Veränderungen der Maximalgeschwindigkeiten von Kanten, die Bundesstraßen oder Bundesautobahnen mit einer Maximalgeschwindigkeit ab 90 km/h darstellen, nach eigenen Annahmen vorgenommen.

- Reduzierung der Maximalgeschwindigkeit von 90 km/h auf eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h.
- Reduzierung der Maximalgeschwindigkeit von 100 km/h auf eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 70 km/h.
- Reduzierung der Maximalgeschwindigkeit von 120, 130 und 140 km/h auf eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 90 km/h.

Auch die Maximalgeschwindigkeiten dieser Kanten werden in Meter pro Sekunde angegeben.

Standorte der privaten Kunden Die exakten Wohnsitze der privaten Kunden, in diesem Fall Privatpersonen, sind durch die Erhebung des Zensus Berlin [1] bekannt. Hierbei werden die Anzahl der Privathaushalte und die Anzahl der Privatpersonen mit deren entsprechenden soziodemographischen Charakteristika (u. a. nach Haushaltsgröße und Altersklassen) pro statistischen Block zur Verfügung gestellt. Nach eigener Auswertung der Daten sind in Berlin 14.553 von insgesamt 24.961 statistischen Blöcken bewohnt [1]. Zur Initialisierung der synthetischen Population werden die einzelnen Privatpersonen nach ihrer Altersklasse herangezogen und nicht die gebildeten Cluster in den jeweiligen statistischen Blöcken, um eine akkurate Simulation zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wird die Anzahl der Privatpersonen der jeweiligen Altersklassen in Punkte innerhalb jedes statistischen Blocks mittels der Zentroidmethode konvertiert.

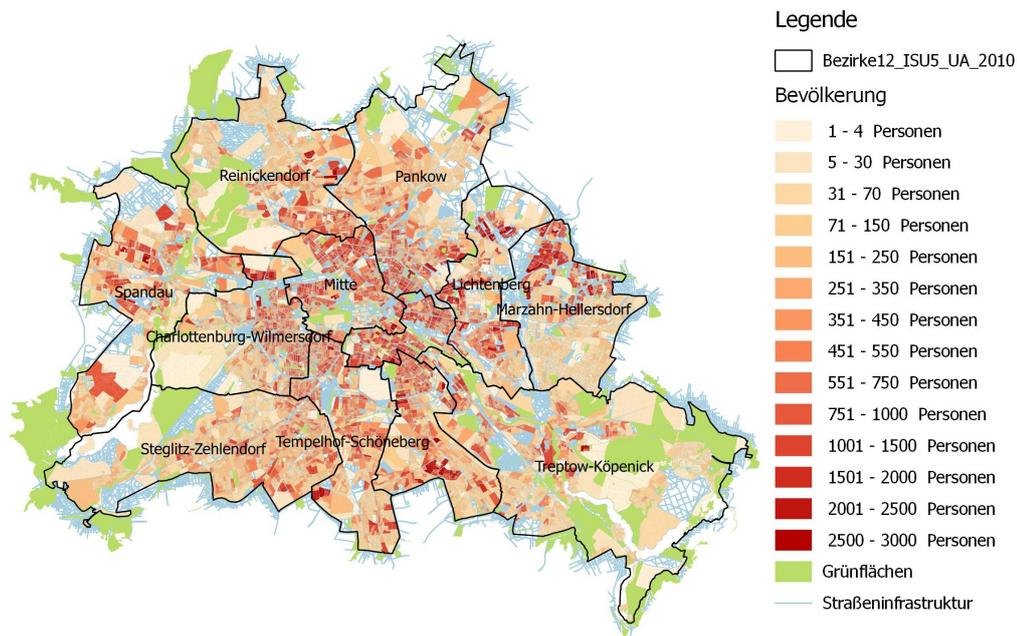


Abbildung 6.1.: Bevölkerungsstruktur in Berlin (Eigene Darstellung nach Zensus Berlin [1]).

Die gebildeten Altersklassen des Zensus [1] sind bereits in der Tabelle 5.2 aufgeführt. In Abbildung 6.1 wird die Anzahl der Personen je statistischen Block in Berlin aufgezeigt.

Im Detail wird die genaue Anzahl privater Personen n je Alterskohorte i , die sich in der synthetischen Welt der MVS befinden, in der Tabelle 6.2 aufgezeigt.

Wie bereits in Kapitel 5.3.2 zur Aufbereitung der SD-Daten für den Transfer zur MVS beschrieben wurde, wird die Grundgesamtheit der Bevölkerung in der MVS je Zeitintervall von den Werten des SD-Modells angepasst. Damit wird die Alterung und der Abgleich der Gesamtanzahl von Privatpersonen in der synthetischen Welt erreicht. Dazu erfolgt der Abgleich dieser Alterskohorten nach der Gesamtanzahl von $b_{i,neu}$ (siehe Formel (5.116)).

Hinsichtlich der *Merkmale der Privatkunden* werden neben dem *Alter* die *Anteile der E-Commerce-Nutzer* α_{EC} und somit die Anteile der privaten Kunden der KEP-Dienstleister an der Grundgesamtheit der Bevölkerung je Alterskohorte als externe Vorgaben in der MVS definiert. Die jeweiligen Anteile wurden aus der Studie „Delivery Tomorrow — Zukunftstrend Nachhaltige Logistik“, die von der Deutschen Post DHL Group [33, S. 152f.] 2010 veröffentlicht wurde, übernommen. In Rahmen dieser Studie wurde im Juni 2010 eine Umfrage zur Erhebung von Einstellungen von Geschäftskunden und Endkonsumenten durchgeführt. Hierbei wurden in sechs Ländern (u. a. USA, Brasilien, China, Indien, Deutschland, Großbritannien) Stichproben erhoben. Für die zwei Zielgruppen wurden jeweils angepasste Fragebögen konzipiert. Zur Stichprobenziehung wurden die Datenbanken Business Panel GMI für Entscheider im Versandbereich und das Toluna Panel für Endkonsumenten genutzt.

Tabelle 6.2.: MVS-Alterskohorten (Eigene Darstellung nach dem Zensus [1]).

i	AK	n
1	0–9	289.408
2	10–19	259.413
3	20 – 29	479.886
4	30 – 39	463.963
5	40 – 49	539.327
6	50 – 59	438.481
7	60 – 69	372.850
8	70 – 79	307.274
9	≥ 80	139.804

Hierbei wurde eine Stichprobe N von 1.800 Endkonsumenten befragt. Die jeweiligen Anteile der privaten KEP-Kunden [%] je Alterskohorte (AK) nach der Deutschen Post DHL Group [33] werden in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

Für die vorliegende Arbeit werden diese Anteile der E-Commerce-Nutzer α_{EC} der sechs Alterskohorten i nach der Deutschen Post DHL Group [33] herangezogen und den bereits definierten neun MVS-Alterskohorten zugeteilt (vgl. Tabelle 5.2).

- Alterskohorte 1 wird nach der MVS-Einteilung in 0 – 9 Jährige und 10 – 19 Jährige differenziert. Hierbei wird angenommen, dass die Alterskohorte 0 – 9 E-Commerce nicht nutzt. Dementsprechend wird der Alterskohorte 10 – 19 ein Anteil am E-Commerce von 6 % zugeordnet.
- Die Alterskohorten 2 – 5 entsprechen der MVS-Einteilung. Demzufolge werden die Werte dieser Alterskohorten herangezogen.
- Alterskohorte 6 wird für die MVS in drei Alterskohorten unterteilt (Alterskohorten 60 – 69, 70 – 79 und ≥ 80). Auf diese drei Alterskohorten wird der Anteil von 6 % nach der Deutschen Post DHL Group gleichmäßig mit jeweils 2 % verteilt.

Zur Initialisierung der Privatkunden in der MVS werden die Initialwerte n der Alterskohorten 1–9 der Gesamtpopulation für das Jahr 2009 bestimmt.

Tabelle 6.3.: Alterskohorten (Eigene Darstellung nach der Deutschen Post DHL Group [33]).

i	AK	%
1	0–19	6
2	20 – 29	36
3	30 – 39	27
4	40 – 49	15
5	50 – 59	9
6	≥ 60	6

Tabelle 6.4.: Initialisierung der Privatkunden.

i	AK	n	$\alpha_{EC,i}$ [%]	$n_{EC,i}$
1	0–9	287.290	0	0
2	10–19	273.114	6	163.868
3	20 – 29	506.652	37	187.461
4	30 – 39	494.311	27	133.464
5	40 – 49	591.014	15	88.652
6	50 – 59	453.684	9	40.832
7	60 – 69	398.706	2	7.974
8	70 – 79	294.306	2	5.886
9	≥ 80	143.598	2	2.872

Wie bereits in Kapitel 6.1.1 zur Parametrisierung des Bevölkerungsmoduls des SD-Modells werden die Initialwerte n der Alterskohorten von der Datenquelle des Statistikamts Berlin-Brandenburg [2] herangezogen. Aus dem Produkt aus n und dem Anteil am E-Commerce je Alterskohorte $\alpha_{EC,i}$ ergeben sich die potentiellen Privatkunden der KEP-Dienstleister je Alterskohorte $n_{EC,i}$ (siehe Tabelle 9.1). Die auszuliefernden Pakete der Privatkunden werden an diese potentiellen Privatkunden zufällig verteilt.

Standorte der gewerblichen Kunden Zur Erhebung der Standorte einerseits von gewerblichen Kunden der KEP-Dienstleister und andererseits von Aktivitätsstandorten der Bevölkerung wird die Datenbank OpenStreetMap [54] ausgewertet. Zu diesem Zweck werden die vorhandenen Dateien zur Flächen-, Gebäude- und Standortnutzung herangezogen. In den Dateien zur Flächen- und Gebäudenutzung werden die einzelnen Nutzungen in Flächen bzw. Polygonen georeferenziert ausgegeben. Diese müssen zunächst mit der Zentroidmethode in Punkte transformiert werden. Die Datei zur Standortnutzung liegt bereits im richtigen Format vor. Insgesamt wurden 49.486 Standortkoordinaten ausgewertet. Die in den Dateien hinterlegten Standorttypen werden nach Flächennutzungstypen (u. a. Industrie, Gewerbe, Landwirtschaft, Freizeit, Einkauf etc.) klassifiziert. Dies wird vorgenommen, um in der Mobilitätssimulation potentielle Senken bzw. Aktivitätsstandorte für den Personenverkehr zu schaffen. Da in der vorliegenden Arbeit auf die Abbildung bzw. Simulation des Personenverkehrs verzichtet wurde, werden diese klassifizierten Standorte zur Parametrisierung der MVS nicht berücksichtigt.

In der Tabelle 6.5 sind einerseits die Standorttypen aufgeführt, die diese Aktivitätsstandorte (u. a. Arbeits-, Ausbildungs-, Freizeitstätten, Einkaufsmöglichkeiten) darstellen. Dazu wird zunächst die Anzahl der jeweiligen Typen und die genauere Spezifizierung angegeben.

Andererseits werden die gewerblichen Kunden identifiziert, die sich von KEP-Dienstleistern beliefern lassen. Dabei handelt es sich zum Einen um *Einzelhändler in Verkaufsräumen*. *Einzelhändler nicht in Verkaufsräumen, an Verkaufsständen und auf Märkten* werden von der Betrachtung ausgeschlossen. Die Einzelhändler in Berlin werden nach der Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ2008) gegliedert [150]. Einzelhändler, die

nur als „Einkaufsmöglichkeit“ klassifiziert wurden, gelten nicht als KEP-affin. Auch öffentliche Einrichtungen, Universitäten, Gastronomie und Dienstleistung (u. a. Reisebüro, Gastronomie) zählen zu den KEP-affinen Branchen.

Tabelle 6.5.: Standorttypen der synthetischen KEP-Welt.

Standorttypen	N	Spezifizierung
Arbeitsstätten	7.463	Industrie-/Gewerbegebiet, Dienstleistungen, Landwirtschaft, Logistiklager, Handwerk, Wasserwerk, Auto-/Bootsverleih, TÜV, Auto-/Motorradwerkstatt
Ausbildungsstätten	3.867	Kindergärten, Schulen
Freizeitstätten	12.274	Erholungsflächen, Freizeiteinrichtungen, Grünanlagen, Religiöse Anlagen, Auto-waschanlage, Soziale Einrichtungen
Arbeitsstätten, Freizeitstätten	1.401	Gesundheitseinrichtungen, Kliniken, Massagesalon
Einkaufsmöglichkeiten	5.462	Autohäuser, Baumärkte, Blumengeschäft/Florist, Garten-Center, Getränkemarkt, Supermarkt, Marktplatz, Möbel/Innenausstattung, Auto-/Motorradhäuser, Bäckerei, Metzgerei, Lebensmittelgeschäft/Tante-Emma-Laden, Feinkost, Gemüsehändler, Bioladen, Seafood, Drogerie, Second Hand, Charity, Fahrradgeschäft
Arbeitsstätten, KEP-Belieferung	2.670	Politik, Verwaltung, Öffentliche Gebäude, Gewerbe: Büro, Polizei, Banken
Arbeitsstätten, Ausbildungsstätten, KEP-Belieferung	386	Universitäten, Forschungseinrichtungen
KEP-Belieferung	156	Reisebüro
Einkaufsmöglichkeiten, KEP-Belieferung	5.617	Übergeordneter Einzelhandel, Einkaufszentrum, Warenhaus, Bekleidung, Stoffgeschäft/Textil, Sport/Outdoor-Laden, Schmuck/Juwelier, Uhrengeschäft, Leder-geschäft, Schuhgeschäft, Elektronikmarkt, Computer-Fachhandel, Telekom/Mobiltelefonladen, Süßwaren, Apotheke, Alkohol, Kaffeeladen, Teeladen, Süßwarenladen, Kunstladen, Sanitätshaus, Haushaltsbedarf, Kiosk, Kosmetikge-schäft/Parfümerie, Erotikhandel, Optiker, Hörgeräte, Bücherladen/Buchhandlung, Andenken/Geschenke, Musikladen, Autoreifen/-equipment, Tabakwaren, Zei-tungshändler, Schreibwaren/Bürobedarf, Fotoladen, Spielzeuggeschäft, Video-thek/Video/Videospiele, Eisenwaren, Zoohandlung/Tierbedarf, sonstige Läden
Access Points, Einkaufsmöglichkeiten, KEP-Belieferung	339	Tankstellen
Freizeitstätten, KEP-Belieferung	8.656	Gastronomie
KEP-Belieferung, Freizeitstätten, Arbeitsstätten	1.195	Schneider, Schönheitspflege: Kosmetiksalon, Friseur, Solarium

KEP-Standorte Die Logistikknoten bzw. Distributionszentren und Abholstellen (u. a. Packstationen, Postfilialen und Paketshops) der größten KEP-Dienstleister (u. a. DHL, UPS, Hermes, DPD, GLS) werden für Berlin erhoben [36, 45, 80, 114, 123].

Die Allokation bzw. Verteilung der KEP-Distributionszentren in Berlin basiert auf den tatsächlichen Standorten. Aufgrund dessen werden die erhobenen Standorte georeferenziert. Hierbei werden die Adressen der jeweiligen Standorte in Geokoordinaten nach dem GK4-Koordinatensystem konvertiert. Die räumliche Verteilung der Standorttypen für den Untersuchungsraum Berlin wird in der Abbildung 6.2 aufgezeigt.

Auf Basis dieser Sekundärdatenerhebung stehen die folgenden Standorttypen im MVS-Basisszenario für Berlin im GK4-Format georeferenziert zur Verfügung.

- 31 Distributionszentren der KEP-Dienstleister
- 2.312 Abholstellen der KEP-Dienstleister (u. a. Paketshops und Postfilialen)
- 162 Packstationen
- 3.290.406 Privatpersonen differenziert nach neun Alterskohorten
- 19.019 Standorte, die sich von KEP-Dienstleistern beliefern lassen
- 11.418 Einzelhändler, die sich nicht von KEP-Dienstleistern beliefern lassen

6.2.2. Merkmale der Akteure

Zudem haben die involvierten Akteure bzw. Standorte dieser Akteure spezifische Merkmale, die an diese verteilt werden müssen. Damit kann eine realistische Welt nach dem Vorbild des Untersuchungsraums aufgebaut werden. Diese spezifischen Merkmale sind in der Abbildung 5.15 hinterlegt.

Merkmale der privaten Kunden Zur Initialisierung der privaten Güternachfrage für einen typischen Tag im Jahr 2009 wird der Initialwert von 99.114 Paketen, die an private Kunden geliefert werden sollen, festgelegt. Dieser initiale Wert wird nach der Berechnung (5.13) (siehe Kapitel 5.1.2) mittels der aufbereiteten Daten vom Statistikamt Berlin-Brandenburg [3], der BIEK [40, 41] und von Manner-Romberg et al. [100] (siehe Kapitel 6.1.2) abgeleitet. Um die Güternachfrage eines Tages zu bestimmen, wird die Formel (5.119) angewandt (siehe Kapitel 5.3.2). Die Gesamtnachfrage $gn_{p,MVS}$ wird dabei zufällig auf die potentiellen Privatkunden der KEP-Dienstleister je Alterskohorte $n_{EC,i}$ (siehe Tabelle 9.1) verteilt. $gn_{p,MVS}$ wird je Iteration in der MVS mittels der SD-Daten angepasst. Ferner wird die *Anzahl der Sendungen bzw. die Bestellfrequenz* eines Privatkunden an einem typischen Tag auf 1 Paket gesetzt [16].

Zudem wird die *Belieferungsform* der Privatkunden genauer bestimmt. Die Belieferungsform kann sich in Hauszustellung, Lieferung zur Packstation, zum Paketshop oder zur nächstgelegenen Postfiliale unterscheiden. Die prozentualen Anteile der verschiedenen Belieferungsformen der Privatkunden werden exogen definiert und mittels Zufallsverteilung den Privatkunden zugeordnet.

6. Parametrisierung des Kopplungsansatzes

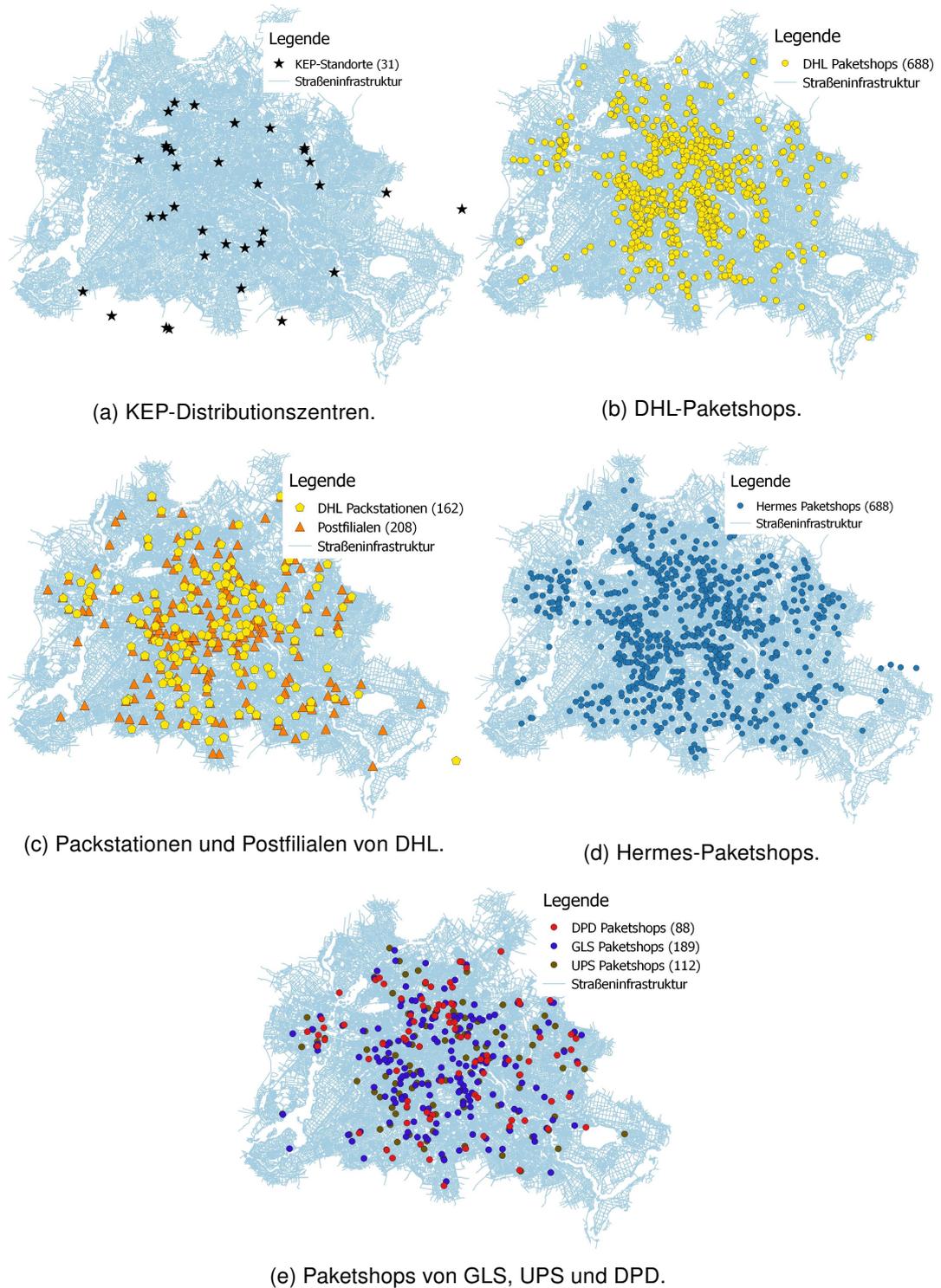


Abbildung 6.2.: KEP-Landschaft in Berlin.

Im Basisszenario wird angenommen, dass Privatkunden nur die Direktzustellung bzw. Hauszustellung in Anspruch nehmen. Hierbei wird für die MVS extern vorgegeben, dass der KEP-Fahrer maximal zwei Pakete pro Stopp abgeben darf. Zusätzlich wird festgelegt, dass die Privatkunden keine Belieferungszeitfenster im Basisszenario im Gegensatz zu den gewerblichen Kunden bestimmen. Die Belieferung der Privatkunden sollte jedoch innerhalb der Betriebszeit des KEP-Dienstleisters von sechs Stunden ausgeführt werden.

Merkmale der gewerblichen Kunden Der Initialwert der gewerblichen Güternachfrage für einen typischen Tag $gn_{o,MVS}$ im Jahr 2009 wird mit 172.296 Paketen, die gewerblichen Kunden zugestellt werden sollen, parametrisiert. Zur Berechnung des Initialwertes wird die Gleichung (5.18) (siehe Kapitel 5.1.2) herangezogen. Zudem werden die aufbereiteten Daten vom Statistikamt Berlin-Brandenburg [3] und der BIEK [40, 41] (siehe Kapitel 6.1.2) genutzt. Um die gewerbliche Güternachfrage eines Tages $gn_{o,MVS}$ abzuleiten, ist eine Umrechnung der Jahres- in Tageswerte nach der Formel (5.119) notwendig (siehe Kapitel 5.3.2). Danach wird $GNK_{o,MVS}$ an die gewerblichen Kunden, die sich von KEP-Dienstleistern beliefern lassen, mittels der Formalisierung $\frac{gn_{o,MVS}}{n_o}$ gleichverteilt. Demzufolge wird die gewerbliche Nachfrage pro Kunde $GNK_{o,MVS}$ jedem KEP-affinen Unternehmen zugeordnet (siehe Kapitel 5.2). Die Güternachfrage gewerblicher Kunden $gn_{o,MVS}$ wird wie bereits die Güternachfrage privater Kunden $gn_{p,MVS}$ basierend auf den SD-Simulationsergebnissen pro Zeitschritt angepasst.

Die Belieferungsform muss bei der Belieferung gewerblicher Kunden nicht berücksichtigt werden, da hierbei ausschließlich eine Hauszustellung erfolgt.

Die Belieferungszeitfenster gewerblicher KEP-Kunden müssen vom KEP-Dienstleister zur Routenplanung beachtet werden. Aufgrund dessen versuchen die KEP-Fahrer nicht nur zeiteffizient durch den Verkehr zu kommen, sondern zudem die Belieferungszeitfenster gewerblicher Kunden einzuhalten. Der prozentuale Anteil der möglichen Belieferungszeitfenster wird exogen festgelegt und zufällig den gewerblichen Kunden zugeordnet. Außerdem können die jeweiligen Belieferungszeitfenster mit Gewichten definiert werden. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch der Wert des Gewichts je definierten Zeitfenster auf 1 gesetzt. Die folgenden Belieferungszeitfenster wurden für das Basisszenario definiert.

- 06:00 – 07:59 Uhr
- 08:00 – 09:59 Uhr
- 10:00 – 12:00 Uhr

Das Merkmal *Wahl zwischen verschiedenen KEP-Dienstleistern* wird sowohl für private als auch für gewerbliche Kunden nicht berücksichtigt. Hierbei wird angenommen, dass alle erhobenen Standorte in Berlin zum gleichen KEP-Dienstleister gehören.

Merkmale der KEP-Dienstleister Wie bereits in Kapitel 5.3.2 zur Aufbereitung der SD-Daten für den Transfer zur MVS erläutert wurde, wird der Flottenbestand des KEP-Dienstleisters fb_{neu} pro Iteration angepasst (siehe Formel (5.116)). Dabei bekommt jedes Distributionszentrum des KEP-Dienstleisters die gleiche Menge an Fahrzeugen mit ihren jeweiligen spezifischen Charakteristika (u. a. Kapazität, Transportkosten, Emissionswerte) zugewiesen. Die jeweiligen Werte dazu werden von der MEP pro Zeitschritt aktualisiert.

In dieser Arbeit wird im Basisszenario nur ein Fahrzeugtyp definiert. Wie bereits in Kapitel 6.1.5 zur Parametrisierung des SD-Submoduls Flottenbestand wird der initiale Flottenbestand für den gesamten Untersuchungsraum FB_I auf Grundlage der Datenquellen von Bogdanski [17], der BIEK [40, 41] und von Manner-Romberg [100] berechnet (siehe Tabelle A.6). Der initiale Wert des Flottenbestands $fb_{CEP,i}$ von 57 Fahrzeugen je Distributionszentrum resultiert aus der Berechnung (5.118) (siehe Kapitel 5.3).

Die Charakteristika des KEP-Fahrzeugs werden initial für das Jahr 2009 mit den folgenden Werten parametrisiert.

- Zulässiges Gesamtgewicht: 3,5 t
- Maximale Kapazität k_T : 160 [PE/F]
- Fixe Kosten $c_{F,LKW,MVS}$: 47,52223942 [€/d]
- Variable Kosten $c_{L,m,MVS}$: 0,000317332 [€/m]
- Zeitabhängige Kosten bzw. Personalkosten $pk_{s,MVS}$: 0,003223249 [€/s]
- Kraftstoffverbrauch $\bar{k}v_{m,MVS}$: 0,000102952 [l/m]
- Adblueverbrauch $\bar{a}v_{m,MVS}$: 0 [l/m]
- Maximale Geschwindigkeit v_{max} : 42 [m/s]

Wobei die Werte der maximalen Kapazität k_T und maximalen Geschwindigkeit v_{max} konstant sind.

Die maximale Kapazität bzw. maximalen Sendungen pro Tour k_T belaufen sich auf 230 Paketeinheiten pro Fahrzeug bzw. Tour. Dieser Wert wurde mittels der folgenden Formel ermittelt.

$$k_T = \frac{n_{LKW}}{w_S} \quad (6.17)$$

wobei

- k_T = Maximale Fahrzeugkapazität [PE/F]
- n_{LKW} = Tatsächliche Nutzlast pro LKW [kg/F]
- w_S = Gewicht pro Sendung [kg/PE]

Grundlage bilden das Gewicht pro Sendung w_S mit einem Wert von 6,3166 kg/PE nach Kille [83] und die maximale Nutzlast pro LKW n_{Lmax} von 1.450 kg/F nach ETM [43].

Im Rahmen von experimentellen Simulationsläufen wurde festgestellt, dass Jsprit die Fahrzeugkapazität k_T maximal ausschöpft und stattdessen die vorgegebenen Zeitfenster bzw. die Betriebszeit des KEP-Dienstleisters nicht berücksichtigt. Jsprit verfolgt hierbei das Ziel, alle Sendungen auszuliefern. Jedoch sollen in der vorliegenden Arbeit einerseits die Betriebszeit des KEP-Dienstleisters und die vorgegebenen Belieferungszeitfenster gewerblicher Kunden maßgeblich berücksichtigt werden. Aufgrund dessen wurde k_T auf den Wert von 160 PE/F reduziert, um diese Vorgaben einhalten zu können. Dieser Wert wird nicht von der MEP angepasst und bleibt konstant.

Die Werte der Kostenparameter des Fahrzeugs fixe Kosten pro LKW $c_{F,LKW,MVS}$, variable Kosten pro Meter $c_{L,m,MVS}$ und die zeitabhängigen Kosten bzw. Personalkosten $pk_{s,MVS}$, genauso wie die weiteren fahrzeugspezifischen Charakteristika Kraftstoffverbrauch $\bar{k}v_{m,MVS}$ und Adblueverbrauch $\bar{a}v_{m,MVS}$ pro Meter werden mittels der MEP-Simulationswerte pro Iteration aktualisiert.

Zur Berechnung der initialen Werte von $c_{F,LKW,MVS}$, $c_{L,m,MVS}$ und $pk_{s,MVS}$ werden dieselben Gleichungen genutzt, die bereits in Kapitel 5.1.2 zur Formalisierung des SD-Submoduls Transportkosten Verwendung fanden. Wie bereits in Kapitel 6.1.7 zur Parametrisierung des SD-Submoduls Transportkosten werden zur Intialisierung dieser Parameter die Datenquellen der BGL [22], der Deutschen Automobil Treuhand GmbH (DAT Group) [32], der ETM [43], der Verkehrs-rundschau [89], des Mineralölwirtschaftsverbands (MWV) e.V. [108], von Moder [109] und von Wittenbrink [173] herangezogen. Die initialen Werte des Kraftstoff- und Adblueverbrauchs werden wie bereits in Kapitel 5.1.2 zur Formalisierung des SD-Submoduls Laufleistung und Kraftstoffverbrauch mittels der Formeln (5.28), (5.29), (5.30) und (5.31) berechnet. Dazu werden die Datenquellen der ETM [43], des Handbuchs Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [71] sowie der Verkehrs-rundschau [89] genutzt. Die Dimensionen der resultierenden, initialen Werte von $c_{F,LKW,MVS}$, $c_{L,m,MVS}$, $pk_{s,MVS}$, $\bar{k}v_{m,MVS}$ und $\bar{a}v_{m,MVS}$ für das Jahr 2009 müssen zu diesem Zweck mittels der Formeln (5.120), (5.121), (5.122) und (5.123) (siehe Kapitel 5.3.2) umgerechnet werden.

Dies gilt auch für die Konversionsfaktoren $\beta_{i,a,MVS}$ der Emissionen CO, HC, NO_x und PM₁₀ (siehe Formel (5.124)). Für die Konversionsfaktoren $\beta_{i,a,MVS}$ werden die folgenden Initialwerte zur Berechnung der Emissionen extern vorgegeben. Wie bereits in Kapitel 6.1.8 zur Parametrisierung des SD-Submoduls Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage findet zur Parametrisierung von $\beta_{i,a,MVS}$ das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßengüterverkehrs [71] Verwendung. Zu diesem Zweck werden die durchschnittlichen Konversionsfaktoren $\beta_{i,j,a}$ jeweils für die Emissionstypen CO, PM₁₀, HC und NO_x berechnet. Danach erfolgt die Umrechnung von g/km in g/m mittels $\frac{\beta_{i,j,a}}{1000}$. Zu diesem Zweck werden die Initialwerte für $\beta_{i,a,MVS}$ für das Jahr 2009 herangezogen.

- HC und NO_x Konversionsfaktor für Diesel $\beta_{2,D}$: 0,001044129 [g/m]
- CO Konversionsfaktor für Diesel $\beta_{3,D}$: 0,000278024 [g/m]
- PM₁₀ Konversionsfaktor für Diesel $\beta_{4,D}$: 0,000090275 [g/m]

Im Gegensatz dazu werden in der MVS die CO₂ Konversionsfaktoren für Diesel $\beta_{1,D}$ und für Adblue $\beta_{1,A}$ extern vorgegeben. Dazu werden die Werte für $\beta_{1,D}$ von 2,628999 kg/l nach der Verkehrsrundschau [89] und für $\beta_{1,A}$ von 0,238 kg/l nach Kranke [90] genutzt. Diese Parameter werden nicht von der MEP aktualisiert.

Die Höchstgeschwindigkeit v_{max} eines leichten Nutzfahrzeugs bis 3,5 t zul. GG. (z. B. Mercedes Sprinter 316 CDI Hochkasten, lang und Iveco Eco Daily 35C 17HV Hochkaste, lang) liegt im Durchschnitt bei 151,2 km/h. Nach Umrechnung in die verwendete Einheit in der MVS wird die Höchstgeschwindigkeit v_{max} des Fahrzeugs mit einem Wert von 42 m/s hinterlegt.

Für die Stoppdauer je zugestellter Sendung t_s wird angenommen, dass ein KEP-Fahrer 60 Sekunden für die Zustellung einer Sendung benötigt. Zudem wird die Dauer des Hin- und Rückwegs des Fahrers pro Stopp auf 60 Sekunden gesetzt. Dabei handelt es sich um externe Vorgaben für die MVS, um die Stoppdauer insgesamt pro Tag $t_{ST,MVS}$ und die mittlere Stoppdauer pro Tour $\bar{t}_{st,T,MVS}$ zu berechnen.

Auch die Betriebszeit des KEP-Dienstleisters wird extern definiert. In diesem Fall wird angenommen, dass die Fahrzeuge zwischen 6 bis 12 Uhr unterwegs sind. Dementsprechend wird die Startzeit für die Fahrzeuge auf 6 Uhr und die Endzeit auf 12 Uhr gesetzt.

Die entsprechenden Attribute der Agenten im System sind entweder bekannt oder werden synthetisch mittels Verteilungsverfahren — in diesem Fall durch Zufallsverteilung — generiert. Diese Verteilungsverfahren werden mit den Werten ausgewählter SD-Parameter je Adapteriteration parametrisiert.

Nach der Sekundärdatenerhebung und -aufbereitung steht die parametrisierte, initiale Welt für die eigentliche Mikrosimulation bereit. Dementsprechend können im nächsten Schritt die initialen Pläne der Güterverkehrsagenten erzeugt werden. Hierbei sind die Start- und Endpunkte der Touren, in diesem Fall die KEP-Distributionszentren, bekannt. Auch wurden die Standorte der Kunden in die synthetische Welt integriert. Zudem kennt der KEP-Dienstleister die Anzahl der Sendungen pro Senke bzw. Stopp. Bei privaten Kunden wird der KEP-Dienstleister über die gewünschten Belieferungsformen privater Kunden in Kenntnis gesetzt. Bei gewerblichen Kunden ist der KEP-Dienstleister über Belieferungszeitfenster, an die er sich bei der Tourenplanung bzw. Routenwahl halten muss, informiert.

7. Kalibrierung des SD-Modells

Basierend auf dem methodischen Vorgehen zur Kalibrierung eines SD-Modells (siehe Kapitel 3.1.3) werden die Ergebnisse der Kalibrierung des entwickelten SD-Ansatzes ausgewertet und kritisch diskutiert. Vornehmlich wurden die Modellparameter der Submodule Bevölkerung, Güternachfrage, Transportkosten und ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage kalibriert. Zur Bestimmung der Prognosegüte werden in der vorliegenden Arbeit die Zeitreihenwerte des Zeithorizonts von 2009 bis 2015 herangezogen (siehe Kapitel 6.1). Zu diesem Zweck werden die Zeitintervalle bei der SD-Simulation auf 1 Jahr definiert.

7.1. Bevölkerung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus der Kalibrierung des Submoduls Bevölkerung präsentiert. Hierzu werden die jeweiligen Modellparameter, die Entwicklungsraten zur Fertilität $\rho_{g,i}$, Mortalität $\rho_{M,i}$, Immigration $\rho_{I,i}$ und Emigration $\rho_{E,i}$, für den Zeitraum von 2009 bis 2015 optimal eingestellt. Wie bereits in Kapitel 6.1.1 beschrieben, wurden die Modellparameter zur initialen Simulation aus der Mittelwertbildung der Werte von 2005 bis 2015 gewonnen und entstammen dem Statistikamt Berlin-Brandenburg [2]. Der Zeitschritt, respektive Time Step, entspricht hierbei 1 Jahr, da die historischen Zeitreihenwerte in dieser Form vorliegen.

Die Tabelle B.1 zeigt die jeweiligen zu optimierenden Konstanten des Modells mit dem bestimmten Wertebereich, Minimum (MIN) und Maximum (MAX), für die Suche im Parameterraum auf. Zudem beinhaltet die Tabelle die resultierenden optimierten Werte (OW) für die jeweiligen Parameter, die zur optimalen Einstellung des finalen Basismodells genutzt werden.

Nach 5.453 Iterationsläufen wurde ein maximaler Payoff von $-1,23484e+010$ erreicht. Im Vergleich zum initialen Suchpunkt des 1. Simulationslaufes, bei dem ein Payoff von $-2,18868e+010$ erzielt wurde, hat der Kalibrierungsprozess die Simulationsergebnisse um 43,58 % verbessert.

Die ausgewählten Parameter zur Bestimmung des maximalen Payoffs sind in diesem Fall die 19 Alterskohorten der Bevölkerung B_i von Berlin. Dabei sollen sich die simulierten Werte des Modells an die historisch verfügbaren Zeitreihenwerte möglichst annähern. In Tabelle 7.1 werden die Kalibrierungsergebnisse anhand von verschiedenen statistischen Maßzahlen bewertet.

Dabei lagen die historischen Werte der 19 Alterskohorten der Bevölkerung B_i des Statistikamts Berlin-Brandenburg [2] für den Zeitraum von 2009 bis 2015 vor.

Tabelle 7.1.: Auswertung der Kalibrierung des Submoduls Bevölkerung.

Beschreibung	P	R^2	RMSE	MAE	MAPE	MAEoM
Bevölkerung 0–9	B_1	0,90554	4.899,10	3.684,07	1,16502	1,19909
Bevölkerung 10–13	B_2	-5,30523	5.602,19	4.738,09	4,39844	4,42668
Bevölkerung 14–19	B_3	-1,89962	8.244,88	7.213,17	4,52017	4,44817
Bevölkerung 20–24	B_4	0,83642	6.144,76	4.318,23	2,08608	2,02626
Bevölkerung 25–29	B_5	0,24724	10.878,7	8.538,16	3,00453	3,00312
Bevölkerung 30–34	B_6	0,84783	6.004,78	4.824,71	1,75122	1,76282
Bevölkerung 35–39	B_7	-0,34978	14.477,8	11.244,3	5,00890	4,80593
Bevölkerung 40–44	B_8	0,59190	16.602,4	14.070,7	6,08690	5,67422
Bevölkerung 45–49	B_9	0,91317	4.313,47	3.180,11	1,11585	1,12686
Bevölkerung 50–54	B_{10}	0,57906	10.302,6	8.213,50	3,15618	3,22498
Bevölkerung 55–59	B_{11}	-3,83587	13.124,5	11.400,1	5,39492	5,33984
Bevölkerung 60–64	B_{12}	0,57195	4.498,31	3.953,24	2,03340	2,05252
Bevölkerung 65–69	B_{13}	0,12777	20.386,9	17.556,3	10,5424	9,79580
Bevölkerung 70–74	B_{14}	-1,06571	9.687,14	7.959,76	4,06002	4,14250
Bevölkerung 75–79	B_{15}	0,83093	7.797,27	5.724,07	3,80791	4,17521
Bevölkerung 80–84	B_{16}	-1,06902	7.716,70	6.206,41	7,73527	7,81206
Bevölkerung 85–89	B_{17}	-0,56176	2.875,29	2.563,31	5,59319	5,64777
Bevölkerung 90–94	B_{18}	0,71429	1.081,93	734,42	3,69125	4,00219
Bevölkerung ≥ 95	B_{19}	-0,86387	2.607,78	2.272,30	41,0703	33,9934

In der Tabelle B.2 werden die historischen Zeitreihenwerte (R) sowie die Simulationswerte vor (S) und nach der Kalibrierung (O) im Vergleich gezeigt. Zudem werden die jeweiligen Abweichungen pro Jahr von S und O zu R hinterlegt.

7.2. Güternachfrage

Im Folgenden werden die Kalibrierungsergebnisse des Submoduls Güternachfrage diskutiert. Dazu werden die optimalen Werte der Entwicklungsraten der privaten $\rho_{GNK,p}$ und gewerblichen Güternachfrage $\rho_{GNK,o}$ sowie des BIP ρ_{BIP} bestimmt. Die bereits in Kapitel 6.1.2 aufgezeigten Mittelwerte der Parameter von 2009 bis 2015, die vom Statistikamt Berlin-Brandenburg [3], von BIEK [40, 41] und Manner-Romberg et al. [100] entnommen wurden, werden im Kalibrierungsprozess dementsprechend angepasst.

In der Tabelle B.3 werden die zu optimierenden Konstanten des Modells mit ihren Minima und Maxima von 2009 bis 2015 aufgezeigt. Ferner werden die optimierten Werte der Parameter, mit denen das finale SD-Modell eingestellt ist, präsentiert.

Für das Submodul Güternachfrage hat die Kalibrierung nach 91 Iterationsläufen einen maximalen Payoff von $-7,97896e+006$ ergeben. Dagegen nimmt der initiale Payoff nach einem Simulationslauf einen Wert von $-1,28686e+007$ an. Dieses Kalibrierungsergebnis entspricht einer Optimierung von 38 %.

Tabelle 7.2.: Auswertung der Kalibrierung des Submoduls Güternachfrage.

Beschreibung	P	R^2	RMSE	MAE	MAPE	MAEoM
Güternachfrage pro Privatkunde	GNK_p	0,99727	0,09598	0,08017	0,70862	0,71069
Güternachfrage pro Mio. € BIP	GNK_o	0,72625	4,62328	3,31459	0,60642	0,60645
BIP	BIP	0,98131	1.067,6	902,191	0,79589	0,81474

In der Tabelle 7.2 sind die jeweiligen Maßzahlen zur Bewertung der Kalibrierungsergebnisse hinterlegt. Hierbei wird ersichtlich, dass R^2 für die Parameter GNK_p und BIP annähernd bei 1 liegt und damit ein starker linearer Zusammenhang besteht. R^2 für GNK_o ist mit einem Wert von 0,72625 als gut zu bewerten. Die mittleren Abweichungen $MAPE$ der drei betrachteten Parameter sind mit einem jeweiligen Wert von unter 1 % sehr niedrig.

Die historischen Werte der Parameter private GNK_p und gewerbliche Güternachfrage GNK_o sowie BIP BIP werden vom Statistikamt Berlin-Brandenburg [3], von BIEK [40, 41] und Manner-Romberg et al. [100] zum Vergleich mit den Kalibrierungsergebnissen herangezogen. Die Tabelle B.4 zeigt im Vergleich die Zeitreihenwerte der Simulation, der Realität und der Optimierung auf.

7.3. Transportkosten

Für das Submodul Transportkosten werden im Folgenden die Kalibrierungsergebnisse vorgestellt. Dabei werden die Entwicklungsraten zu den einzelnen Transportkostenbestandteilen (u. a. Kraftstoffpreis ρ_{KP} , Adbluepreis ρ_{AP} , Schmierstoffkosten ρ_{SC} , Reifenpreis ρ_{RP} , Kaufpreis ρ_{LP} , Instandhaltungs- und Reparaturkosten ρ_{IR} , sonstige Kosten ρ_{SO} , Personalkosten pro Fahrer ρ_{PK}) an die historisch verfügbaren Werte nach der BGL [22] und der ETM [43] (siehe Kapitel 6.1.7) angepasst.

Die Tabelle B.5 zeigt die zu optimierenden Konstanten des Modells mit den jeweiligen Minima und Maxima. Diese Minima und Maxima der betrachteten Variablen wurden aus den Zeitreihenwerten von 2009 bis 2015 gebildet. Zudem werden die aus dem Kalibrierungsverfahren resultierenden, optimierten Werte in der Tabelle aufgezeigt. Damit wird das finale Basisszenario parametrisiert.

Mittels der Kalibrierung des Submoduls Transportkosten wurde nach 505 Iterationsläufen ein maximaler Payoff von $-1,32184e+006$ erreicht. Im Vergleich zum initialen Payoff von $-2,73754e+006$ konnte eine Verbesserung von 51,7 % erzielt werden.

Die Tabelle 7.3 zeigt die statistische Auswertung der Kalibrierung des Submoduls Transportkosten. Insbesondere bei den Parametern Reifenpreise RP , Instandhaltung und Reparatur pro km IR sowie Personalkosten pro Fahrer PK erreicht R^2 jeweils einen Wert von annähernd 1. Bei diesen Parametern konnte ein starker linearer Zusammenhang festgestellt werden. Dagegen nimmt R^2 beim Parameter Schmierstoffkosten pro km SC einen Wert von annähernd 0 ein. Dies deutet auf keinen linearen Zusammenhang hin.

Tabelle 7.3.: Auswertung der Kalibrierung des Submoduls Transportkosten.

Beschreibung	P	R^2	RMSE	MAE	MAPE	MAEoM
Kraftstoffpreis	<i>KP</i>	-0,47824	0,16965	0,13653	10,1808	10,4237
Adbluepreis	<i>AP</i>	-0,54514	0,05347	0,04279	16,2904	17,7463
Schmierstoffkosten pro km	<i>SC</i>	0,10380	0,00022	0,00018	7,50980	7,73750
Reifenpreise	<i>RP</i>	0,99905	0,79566	0,62426	0,07352	0,07451
Kaufpreis für 1 LKW	<i>LP</i>	0,77173	304,123	251,201	0,65163	0,65400
Instandhaltung und Reparatur pro km	<i>IR</i>	0,97327	0,00061	0,00049	0,61223	0,60479
Sonstige Kosten pro LKW	<i>SO</i>	-0,54733	188,783	162,294	2,58467	2,60651
PK pro Fahrer	<i>PK</i>	0,97318	246,381	195,847	0,62810	0,64613

Hinsichtlich des mittleren absoluten, prozentualen Fehlers *MAPE* wird auffällig, dass gerade die Simulationsergebnisse der Parameter Kraftstoffpreis *KP* mit über 10 %, Adbluepreis *AP* mit über 16 % sowie Schmierstoffkosten pro km *SC* mit 7,5 % stärker von den historischen Zeitreihenwerten abweichen als die weiteren Parameter dieses Submoduls, die im Mittel zwischen 0,6 und 2,5 % Abweichung liegen.

Die historischen Zeitreihenwerte der Kostenbestandteile der variablen c_L , fixen c_F und zeitabhängigen Transportkosten c_{PK} wurden mittels der in Tabelle 7.4 dargelegten Formalisierungen berechnet.

In der Tabelle B.6 werden die historischen Daten den Simulations- und Kalibrierungsergebnissen gegenübergestellt.

7.4. Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage

Die Kalibrierungsergebnisse des Submoduls Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage werden im Folgenden beschrieben. Zu diesem Zweck wurden die Optima der Modellparameter Konversionsfaktoren für den GV $\beta_{i,j,a}$ je Emissionstyp i , Emissionsklasse j und Antriebsform a bestimmt.

Tabelle 7.4.: Berechnung der historischen Zeitreihenwerte der Transportkostenbestandteile.

Transportkostenbestandteile	Formel
Kraftstoffpreis <i>KP</i>	(5.48)
Adbluepreis <i>AP</i>	(5.48)
Schmierkosten pro km <i>SC</i>	(5.51)
Reifenpreis <i>RP</i>	(5.54)
Kaufpreis eines LKW <i>LP</i>	(5.57)
Kosten zur Instandhaltung und Reparatur pro km <i>IR</i>	(5.61)
Sonstige Kosten pro Fahrzeug <i>SO</i>	(5.70)
Personalkosten pro Fahrer <i>PK</i>	(5.74)

Tabelle 7.5.: Auswertung der Kalibrierung des Submoduls Ökologische Effekte.

Beschreibung	P	R^2	RMSE	MAE	MAPE	MAEoM
HC+NO _x Konversionsfaktor LKW	$\beta_{g,2}$	0,99976	0,004530	0,001696	0,34754	0,33006
CO Konversionsfaktor LKW	$\beta_{g,3}$	0,99999	0,000079	0,000068	0,17735	0,08673
PM ₁₀ Konversionsfaktor LKW	$\beta_{g,4}$	0,99999	0,000030	0,000027	0,16381	0,08428

Die bereits in Kapitel 6.1.8 genutzten Mittelwerte von 2009 bis 2030 wurden vom Handbuch Emissionsfaktoren des Straßengüterverkehrs [71] herangezogen. Die Tabelle B.7 zeigt die jeweiligen zu optimierenden Konstanten des Modells mit Minima und Maxima für die Suche im Parameterraum auf. Diese resultieren aus den vorhandenen Zeitreihenwerten von 2009 bis 2030. Die Tabelle zeigt zudem die bestimmten optimierten Werte der jeweiligen Parameter, die zur optimalen Einstellung des finalen Basismodells genutzt werden.

Die Kalibrierung des Submoduls Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage erzielte nach 3.797 Iterationen einen maximalen Payoff von -0.00342693. Im Gegensatz zum initialen Payoff von -0.0146354 wurden die betrachteten Modellparameter um 76,6 % optimiert.

In der Tabelle 7.5 werden die Auswertungsergebnisse zu den Payoff-Parametern aufgezeigt. Die Konversionsfaktoren je Emissionstyp und Antriebstyp für den GV $\beta_{i,a}$ werden anhand von Streuungsmaßen genauer analysiert. Hierbei ist zu sehen, dass sich das Bestimmtheitsmaß R^2 der betrachteten Parameter sehr nahe an 1 annähert. Dies zeigt, dass die unabhängigen Parameter sehr gut dazu geeignet sind, die Varianz der abhängigen zu erklären. Basierend darauf ist eine sehr gute Modellanpassung möglich. Dementsprechend fallen die mittleren, prozentualen Abweichungen $MAPE$ mit einem Wert von unter 1 % sehr niedrig aus.

Die realen, historischen Werte zu den mittleren Konversionsfaktoren $\beta_{i,a}$ der Emissionstypen CO, PM₁₀, HC und NO_x werden mittels der Formel (5.84) berechnet. Wie bereits erwähnt, werden diese Werte nur für dieselbetriebene Fahrzeuge bestimmt. Weiterführend werden die historischen Zeitreihenwerte der Emissionen e_i mittels der Formalisierung (5.85) für den GV abgeleitet. Die Tabelle B.8 zeigt die Zeitreihen der historischen Werte im Vergleich zu den Simulations- und Optimierungsergebnissen im Detail auf.

8. Entwicklung und Definition der Szenarien

In diesem Kapitel erfolgt die Formulierung und Definition ausgewählter Szenarien, die einen externen Eingriff auf das modellierte Verkehrssystem sowohl in der MEP als auch in der MVS nehmen. Die Wahl fiel hierbei auf spezifische verkehrsplanerische und logistische Maßnahmen, deren Wirkungen auf den Verkehr, die Logistik und die Umwelt mittels des Rückkopplungsansatzes abgeschätzt werden sollen. Im Speziellen wurden die Cordon-Maut, die Distanzabhängige Maut und Packstationen ausgewählt. Diese Maßnahmen haben einen vermeintlich maßgeblichen Einfluss auf das betrachtete urbane Verkehrssystem sowohl im zeitlichen Entwicklungsverlauf als auch auf der räumlichen Ebene.

Bei einer Maut müssen Verkehrsteilnehmer für die Benutzung der Straßenverkehrsinfrastruktur Gebühren entrichten. Eine Maut wird vornehmlich von der Öffentlichen Hand implementiert, die diese Gebühren zur Instandhaltung und zum Ausbau der Straßeninfrastruktur einsetzt. Zudem zielt diese verkehrsplanerische Maßnahme auf die Verkehrsreduzierung und -verlagerung ab. In deutschen Städten bzw. Kommunen existiert bisher kein gesetzlicher Rahmen zur Implementierung einer LKW-Maut, einer sogenannten City-Maut. Jedoch besteht seit 2005 eine LKW-Maut auf deutschen Bundesautobahnen, die von der Länge der Strecke, Anzahl der Achsen, Schadstoffklasse und Gesamtmasse abhängig ist. [21] Sie gilt seit 2005 für LKW ab 12 Tonnen zul. GG und seit 2015 für LKW ab 7,5 Tonnen zul. GG. (siehe SVG [156])

Eine Cordon-Maut ist als eine gebietsbezogene Maut definiert. Dieser Mauttyp wurde bereits in den Städten Stockholm, London und Mailand implementiert. Für die Einfahrt in ein abgegrenztes Gebiet, meist der Innenstadtbereich, muss jeder Verkehrsteilnehmer bzw. jedes Fahrzeug eine Tagesgebühr zur Benutzung der Mautzone entrichten. Bei der Überquerung der Einfahrtsbereiche in die Mautzone fallen demzufolge Cordon-Mautkosten pro Tag und Fahrzeug an. [97]

Eine Distanzabhängige Maut gilt auf ausgewiesenen Kanten des Straßeninfrastrukturnetzwerks innerhalb einer abgegrenzten Mautzone. Ausgewählte Straßentypen werden als Mautabschnitte definiert. Demzufolge fallen Gebühren für die zurückgelegte Distanz innerhalb der Mautzone an. Dieses Mautkonzept wurde bisher nicht in Städten umgesetzt. Sie ist vergleichbar mit der LKW-Maut auf deutschen Bundesautobahnen [21].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird sowohl für die Cordon-Maut als auch für die Distanzabhängige Maut angenommen, dass Mautgebühren von LKW bis 3,5 Tonnen zul. GG zu entrichten sind. Bezogen auf die Distanzabhängige Maut wird festgelegt, dass diese Gebühren auf Hauptverkehrs- und Erschließungsstraßen innerhalb der definierten Mautzone anfallen. Falls sich Bundesstraßen und Bundesautobahnen innerhalb

dieses Gebietes befinden, sind diese auch als Mautstrecken ausgewiesen. Durch die Cordon-Maut und Distanzabhängige Maut sind Effekte auf die Transportkosten der Logistikdienstleister, vornehmlich auf die variablen Kosten, zu erwarten. Eine weitere Hypothese ist in diesem Rahmen, ob dadurch die Fahrten in die Mautzone reduziert werden. Diese Hypothese wird jedoch kritisch hinterfragt, da die Logistikdienstleister die Belieferung ihrer Kunden in den Innenstädten durchführen müssen.

Seit 2001 wird das logistische Zustellkonzept der Packstationen von der Deutschen Post DHL Group [35] in Deutschland stetig ausgebaut. Die Deutsche Post DHL Group [35] stellt dieses Angebot vornehmlich ihren privaten Kunden als Belieferungsform, alternativ zur Hauszustellung, zur Verfügung. Vorteil ist dabei, dass der Kunde bei der Zustellung der Pakete nicht zuhause sein muss und sein Paket innerhalb eines begrenzten Zeitraums flexibel von der Packstation abholen kann. In diesem Zusammenhang sind die Effekte des Ausbaus des Zustellkonzeptes Packstationen und deren Kapazitäten auf das Güterverkehrsaufkommen, die Laufleistung, den Kraftstoffverbrauch, die Transportkosten und dementsprechend auch auf die Umwelt im Detail innerhalb eines langfristigen Betrachtungshorizonts zu untersuchen und abzuschätzen.

Im Folgenden wird die Formalisierung dieser Maßnahmenzenarien sowohl im Rahmen der MEP und der MVS als auch der Kopplung im Detail aufgezeigt. Danach erfolgt die Parametrisierung und Kalibrierung der Szenarien.

8.1. Formalisierung

In diesem Kapitel wird das zuvor beschriebene Basisszenario um ausgewählte Maßnahmenzenarien erweitert. Dabei handelt es sich um die Maßnahmen Packstationen, Distanzabhängige Maut und Cordon-Maut. Diese Maßnahmenzenarien werden im Folgenden in der MEP, der MVS und der Kopplung formalisiert. Die Abbildung 8.1 zeigt den Rückkopplungsansatz zwischen SD und MVS für die drei ausgewählten Maßnahmen im Überblick.

8.1.1. Packstationen

Die logistische Maßnahme Packstationen wird im Folgenden formalisiert. In diesem Zusammenhang sind die Effekte des Ausbaus des Zustellkonzeptes Packstationen und deren Kapazitäten auf das Güterverkehrsaufkommen, die Laufleistung, den Kraftstoffverbrauch, die Transportkosten und dementsprechend auch auf die Umwelt im Detail innerhalb eines langfristigen Betrachtungshorizonts zu untersuchen und abzuschätzen.

SD-Modell

Das Szenario zur Packstation wird im folgenden Abschnitt für das SD-Modell in formalisierter Form aufbereitet. Dieses Submodul hat keine Auswirkungen auf das übrige SD-Gesamtsystem und dient ausschließlich zur Anpassung der synthetischen Welt in der MVS.



Abbildung 8.1.: Maßnahmenszenarien: Datentransfer zwischen SD und MVS.

Im Folgenden wird die Entwicklung der *Anzahl an Packstationen* PS und deren *Kapazität* k_{PS} zur Ableitung der *verfügbaren Kapazität* $v_{k_{PS}}$ modelliert.

$$V_{PS} = \rho_{PS} PS \quad (8.1)$$

wobei

V_{PS} = Entwicklung der Anzahl der Packstationen [PS/a]

ρ_{PS} = Entwicklungsrate Packstationen [%/a]

PS = Anzahl der Packstationen [PS]

$$PS(t) = \int_0^t [V_{PS}(\tau)] \delta\tau + PS(0) \quad (8.2)$$

$$V_{K,PS} = \rho_{K,PS} K_{PS} \quad (8.3)$$

wobei

$V_{K,PS}$ = Entwicklung der Kapazität pro Packstation [(PE/PS)/a]

$\rho_{K,PS}$ = Entwicklungsrate Kapazität pro Packstation [%/a]

K_{PS} = Kapazität pro Packstation [PE/PS]

$$K_{PS}(t) = \int_0^t [V_{K,PS}(\tau)] \delta\tau + K_{PS}(0) \quad (8.4)$$

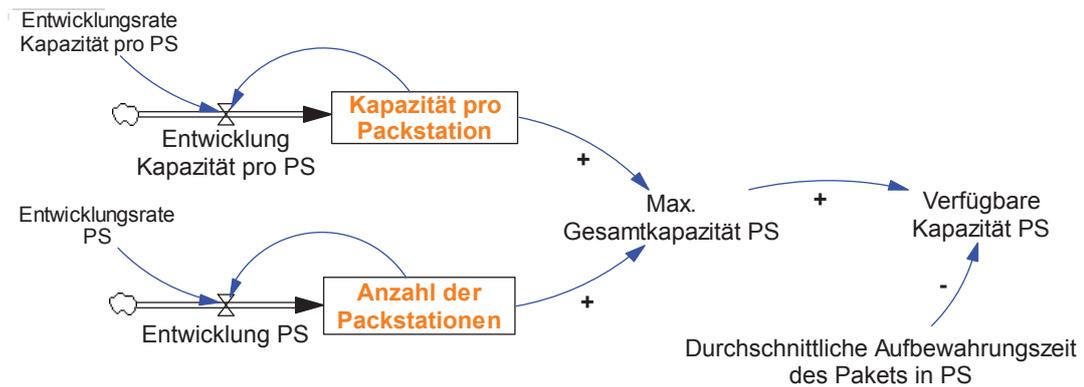


Abbildung 8.2.: Flussdiagramm zur Entwicklung der Packstationen.

$$k_{PS} = K_{PS} PS \quad (8.5)$$

wobei

$$k_{PS} = \text{Max. Kapazität der Packstationen [PE]}$$

$$vk_{PS} = \frac{k_{PS}}{\tau} \left(1 - \frac{\bar{t}_{AZ}}{365}\right) \quad (8.6)$$

wobei

$$vk_{PS} = \text{Verfügbare Kapazität der Packstationen [PE/a]}$$

$$\bar{t}_{AZ} = \text{Durchschnittliche Aufbewahrungszeit des Pakets in einer Packstation [d]}$$

In Abbildung 8.2 wird das Submodul Packstationen im Detail abgebildet.

MVS

Wie in Kapitel 6.2 beschrieben, wurden die Packstationen in Berlin erhoben und liegen in georeferenzierter Form vor. Ihre Positionen sind in der synthetischen Welt dementsprechend als Knoten V durch eine x- und y-Koordinate definiert. (siehe Abbildung 6.2c) Jeder dieser Knoten besitzt darüber hinaus die Eigenschaft Kapazität pro Packstation $K_{PS,MVS}$.

Im Rahmen dieses Szenarios kann extern bestimmt werden, wie hoch die jeweiligen Anteile an Hauszustellungen zu Privatkunden oder zu Packstationen sind.

Falls die maximale Kapazität einer Packstation $K_{PS,MVS}$ bereits ausgeschöpft bzw. eine Packstation voll ausgelastet ist, wird angenommen, dass der KEP-Fahrer die restlichen, auszuliefernden Pakete der nächstgelegenen Postfiliale zustellt.

Kopplungsansatz

Der Kopplungsansatz muss für das Szenario Packstationen erweitert werden, um vornehmlich den Datentransfer der Parameter Anzahl der Packstationen PS und Kapazität pro Packstationen K_{PS} vom SD-Modell zur MVS zu gewährleisten. Wie bereits in Kapitel 5.3.2 zur Aufbereitung der Bevölkerung je Alterskohorte für die MVS, wird PS vom SD-Modell zur MVS transferiert, um die synthetische Population der Packstationen hinsichtlich ihrer Gesamtanzahl zu aktualisieren und anzupassen.

Hierbei wird ein Abgleich zwischen der Anzahl der Packstationen in der MVS und der des SD-Modells vorgenommen.

$$PS_{akt} = PS_{neu} - PS_{alt} \quad (8.7)$$

wobei

PS_{akt} = Packstationen der aktuellen Periode [PS]

PS_{neu} = Packstationen vom SD-Modell [PS]

PS_{alt} = Packstationen der letzten Periode [PS]

PS_{akt} sind dabei die Packstationen, die in der alten Periode in der MVS noch nicht implementiert wurden. Dementsprechend werden diese für die aktuelle Periode zufällig im Untersuchungsraum verteilt.

Die im SD-Modell berechnete Kapazität pro Packstation K_{PS} wird pro Zeitschritt an die MVS transferiert und jeder Packstation der MVS-Welt zugeordnet.

Zu erwarten sind Wirkungen auf die Sendungen pro Tour s_T , Transportdistanz pro Tour d_T , den Dropfaktor B2C/C2C β_p und die durchschnittliche Stopzeit \bar{t}_{st} bedingt durch den Einsatz von Packstationen in der synthetischen Welt der MVS. Diese Parameter werden im SD-Modell durch sich verändernde Belieferungsmuster von der MVS angepasst. Gleiches gilt für den initialen Wert der Anzahl der genutzten LKW FB_I .

8.1.2. Distanzabhängige Maut

Bezogen auf die Distanzabhängige Maut wird erwartet, dass diese Auswirkungen auf die Transportkosten der Logistikdienstleister, vornehmlich auf die variablen Kosten, haben werden. Ob eine Verkehrsreduzierung oder Verkehrsverlagerung des Güterverkehrs in Innenstädten dadurch erreicht wird, ist kritisch zu hinterfragen.

SD-Modell

In diesem Abschnitt erfolgt die Formalisierung der Distanzabhängigen Maut. Diese Maßnahme findet vornehmlich im Submodul Transportkosten als externer Eingriff Berücksichtigung (siehe Kapitel 5.1.2).

Die distanzabhängigen Mautkosten c_{DM} entstehen aus dem Zusammenhang der *Leistungsleistung innerhalb der Mautzone* l_{cc} und der sich verändernden *Mautkostensätze pro km DM*.

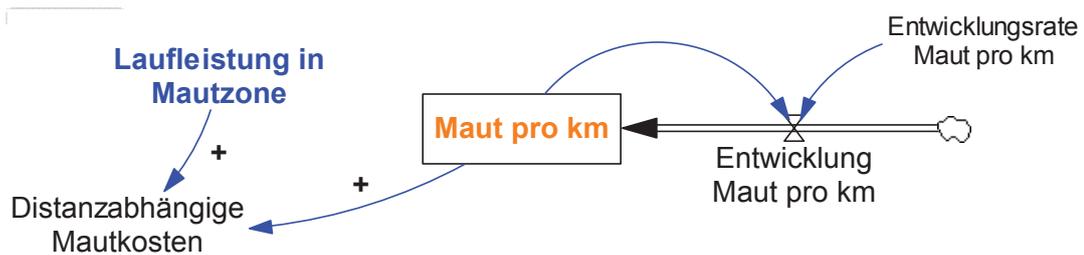


Abbildung 8.3.: Flussdiagramm zur Entwicklung der Distanzabhängigen Maut.

$$V_{DM} = \rho_{DM} DM \quad (8.8)$$

wobei

V_{DM} = Entwicklung des distanzabhängigen Mautpreises [€/km*a]

ρ_{DM} = Entwicklungsrate distanzabhängiger Mautpreis [%/a]

DM = Distanzabhängiger Mautpreis pro km [€/km]

$$DM(t) = \int_0^t [V_{DM}(\tau)] \delta\tau + DM(0) \quad (8.9)$$

$$c_{DM} = l_{cc} DM \quad (8.10)$$

wobei

c_{DM} = Kosten für die Distanzabhängige Maut [€/a]

l_{cc} = Laufleistung innerhalb der Mautzone [km/a]

In Abbildung 8.3 wird das Submodul Distanzabhängige Maut als Flussdiagramm dargestellt.

c_{DM} wird hierbei zu den variablen Kosten pro Jahr c_L hinzuaddiert. Dadurch verändert sich die Formalisierung (5.64).

MVS

Zur Abbildung der distanzabhängigen Mautzone für die synthetische Welt von Berlin liegt ein von Rieser [124] angepasstes Infrastrukturnetzwerk vor. Die Kanten des Netzwerks $E_{i,DM}$, die innerhalb der Umweltzone und dementsprechend in der Mautzone von Berlin liegen, werden ausgewählt und jeweils als Mautabschnitte definiert. Dementsprechend besitzen diese Kanten neben den üblichen Eigenschaften (u. a. Länge, Geschwindigkeit bei freier Fahrt, Kapazität, Anzahl der Spuren) zudem die Spezifikation als Mautstrecke. Dazu werden für die selektierten Kanten die distanzabhängigen Mautkosten pro m DM_{MVS} hinterlegt. Mittels der Ergebnisse aus dem SD-Modell kann dieser Parameter über die Zeit in der MVS angepasst werden.

Dementsprechend wird in der MVS die Laufleistung $l_{gv,cc}$ gemessen, die in der Mautzone innerhalb eines Tages zurückgelegt wird, und an das SD-Modell zur Anpassung transferiert. Wie bereits in Formel (5.89) (siehe Kapitel 5.2.3) werden nur die Kanten $E_{i,DM}$ berücksichtigt, die von den Fahrzeugen innerhalb der Mautzone befahren werden.

$$l_{gv,cc} = \sum_{i=1}^n E_{i,DM} \quad (8.11)$$

wobei

$l_{gv,cc}$ = Laufleistung innerhalb der Mautzone [m/d]
 $E_{i,DM}$ = Länge einer Kante i [m]

Kopplungsansatz

Die Ergebnisse des Parameters DM des SD-Modells werden hierbei zur Anpassung der distanzabhängigen Mautkosten pro m DM_{MVS} in der MVS verwendet. Zu diesem Zweck erfolgt eine Umrechnung.

$$DM_{MVS} = \frac{DM}{1000} \quad (8.12)$$

wobei

DM_{MVS} = Distanzabhängige Mautkosten pro m [€/m]
 DM = Distanzabhängige Mautkosten pro km [€/km]

Die zuvor gemessene Laufleistung innerhalb der Mautzone $l_{gv,cc}$ in der MVS wird dementsprechend zur Anpassung des Parameters l_{cc} im SD-Modell transferiert. Dazu muss der erhobene Tageswert von $l_{gv,cc}$ in der Kopplung auf Jahreswerte für das SD-Modell umgerechnet werden.

$$l_{cc} = \frac{l_{gv,cc}}{1000} \cdot 304,78 \quad (8.13)$$

wobei

l_{cc} = Laufleistung innerhalb der Mautzone [km/a]
 $l_{gv,cc}$ = Laufleistung innerhalb der Mautzone [m/d]

Sowohl in der MVS als auch im SD-Modell ist eine Erhöhung der Transportkosten, insbesondere der variablen Kosten c_L , durch diese Maßnahme zu erwarten.

8.1.3. Cordon-Maut

Wie bereits bei der Distanzabhängigen Maut sind durch die Cordon-Maut Effekte auf die Transportkosten der Logistikdienstleister, vornehmlich auf die variablen Kosten, zu erwarten. Eine weitere Hypothese ist in diesem Rahmen, ob in diesem Zuge die Fahrten in die Cordon-Zone, häufig die Innenstadtbereiche, reduziert werden. Diese Hypothese wird jedoch kritisch hinterfragt, da die Logistikdienstleister die Belieferung ihrer Kunden in den Innenstädten durchführen müssen.

SD-Modell

Das Submodul zur Cordon-Maut wird als externer Eingriff im Submodul Transportkosten integriert (siehe Kapitel 5.1.2).

Die Kosten für die Cordon-Maut c_{CM} resultieren dabei aus der Anzahl der Touren gvn_{cc} , die in der Mautzone durchgeführt werden, und der Entwicklung der Cordon-Maut pro Tag und Fahrzeug CM . Im Folgenden werden diese Zusammenhänge formalisiert.

$$V_{CM} = \rho_{CM} CM \quad (8.14)$$

wobei

V_{CM} = Entwicklung der Cordon-Maut [€/F*a]

ρ_{CM} = Entwicklungsrate Cordon-Maut [%/a]

CM = Cordon-Maut pro Tag und LKW [€/F]

$$CM(t) = \int_0^t [V_{CM}(\tau)] \delta\tau + CM(0) \quad (8.15)$$

$$c_{CM} = gvn_{cc} CM \quad (8.16)$$

wobei

c_{CM} = Kosten für die Cordon-Maut [€/a]

gvn_{cc} = Anzahl der Touren innerhalb der Mautzone [F/a]

In Abbildung 8.4 wird das Submodul Cordon-Maut als Flussdiagramm aufgezeigt.

c_{CM} muss dabei zu den variablen Kosten pro Jahr c_L hinzuaddiert werden. Dadurch wird die Formalisierung (5.64) angepasst.

MVS

In der MVS wird die Cordon-Maut im Netzwerk hinterlegt. Dieses veränderte Netzwerk wird von Rieser [124] herangezogen, das für Berlin vorliegt. In diesem Szenario wurden zunächst die Kanten $E_{i,CM}$, die die Cordon-Mautzone — in diesem Fall die Umweltzone von Berlin — abgrenzen, selektiert und definiert. Hierbei werden zudem die Kosten für die Cordon-Maut pro Tag und LKW CM_{MVS} hinterlegt.



Abbildung 8.4.: Flussdiagramm zur Entwicklung der Cordon-Maut.

Dementsprechend können in der MVS die Touren $gvn_{cc,MVS}$ gemessen werden, die in die Cordon-Mautzone innerhalb eines Tages einfahren und an das SD-Modell zur Anpassung transferiert werden.

$$gvn_{cc,MVS} = \sum_{i=1}^n T_{cc} \quad (8.17)$$

wobei

$$\begin{aligned} gvn_{cc,MVS} &= \text{Gesamtgüterverkehrsnachfrage in der Cordon-Mautzone [F/d]} \\ T_{cc} &= \text{Tour in der Cordon-Mautzone [F]} \end{aligned}$$

Die daraus resultierenden, zusätzlichen Transportkosten für die Transportdienstleister können dementsprechend in der MVS berechnet und aufgezeigt werden.

Kopplungsansatz

Die Ergebnisse zur Cordon-Maut pro Tag und LKW CM des SD-Modells werden hierbei zur Anpassung des Parameters CM_{MVS} in der MVS verwendet. Eine Umrechnung mittels der Kopplung ist nicht notwendig, da beide Werte die Kosten pro Tag und LKW abbilden.

Die von der MVS erhobenen Touren $gvn_{cc,MVS}$, die in der Mautzone durchgeführt wurden, müssen beim Transfer noch an die Anforderungen des SD-Modells für den Parameter gvn_{cc} angepasst werden.

$$gvn_{cc} = gvn_{cc,MVS} \cdot 304,78 \quad (8.18)$$

wobei

$$\begin{aligned} gvn_{cc} &= \text{Touren in der Cordon-Mautzone pro Jahr [F/a]} \\ gvn_{cc,MVS} &= \text{Touren in der Cordon-Mautzone pro Tag [F/d]} \end{aligned}$$

Sowohl in der MVS als auch im SD-Modell ist eine Erhöhung der variablen Kosten c_L durch diese Maßnahme zu erwarten.

8.2. Parametrisierung

In diesem Abschnitt werden die zuvor formalisierten Szenarien parametrisiert. Im Folgenden werden die herangezogenen Sekundärdatenquellen nach Ihrer Datenqualität evaluiert und die Datenaufbereitung zur Parametrisierung des Modellierungsansatzes beschrieben.

8.2.1. Packstationen

Zunächst erfolgt die Parametrisierung der Maßnahme Packstationen.

SD-Modell

Zur Parametrisierung des Szenarios Packstationen war es notwendig, die Anzahl der Packstationen in Berlin PS von 2009, die mittlere Entwicklungsrate der Packstationen ρ_{PS} für den Zeitraum von 2009 bis 2015 sowie die Kapazität pro Packstation K_{PS} und dessen mittlere Entwicklungsrate $\rho_{K,PS}$ zu bestimmen.

Da das logistische Konzept der Packstationen in Deutschland vornehmlich die Deutsche Post DHL Group für ihre Privatkunden zur Verfügung stellt, sind die notwendigen Daten zur Parametrisierung dieses Submoduls an die vorhandenen Daten der Deutschen Post DHL Group [35] angelehnt. Deren Pressestelle informierte seit der Implementierung der Packstationen 2001 in regelmäßigen Abständen über den Ausbau des Konzeptes in Deutschland. In diesem Kontext sind folgende Eckwerte vorhanden.

- Anzahl der Packstationen
- Kapazität der Fächer insgesamt
- Anzahl der Städte, in denen das Konzept implementiert wurde
- Anzahl der Kunden

Dementsprechend liegen die konkreten Zahlen zur Anzahl der Packstationen und Kapazität der Fächer insgesamt für den Zeitraum von 2001 bis Oktober 2016 für Deutschland vor.

Vor dem Hintergrund, dass in Berlin die Packstationen ab 2008 implementiert wurden, werden die Veränderungsrate zu den Packstationen ρ_{PS} pro Jahr für den Zeitraum von 2009 bis 2015 nach der Formel (6.2) berechnet.

Zur Anzahl der Packstationen in Berlin und deren Entwicklung seit 2008 lassen sich keine Informationen finden. Zu diesem Zweck wurde, wie bereits in Kapitel 6.2 erwähnt, eine eigene Erhebung der Packstationen in Berlin über eine Adressrecherche durchgeführt. Dazu wurden Onlinequellen [36, 45, 80, 114, 123] herangezogen. Zum Zeitpunkt der Erhebung (Dezember 2015) waren 162 Packstationen in Berlin implementiert.

Um den Initialwert von PS für Berlin zur Startzeit der Simulation 2009 zu bestimmen, wurden mittels der berechneten Entwicklungsraten $\rho_{PS}(t + 1)$ für Deutschland und des

ausgewiesenen Wertes von 162 Packstationen in Berlin im Jahr 2015 die weiteren Werte von PS für die jeweiligen Jahre 2009 bis 2014 mittels der Formel (6.4) berechnet. Daraus ergibt sich der Startwert von PS für Berlin von 147 Packstationen im Jahr 2009.

Die durchschnittliche Kapazität je Packstation K_{PS} pro Jahr im Zeitraum von 2009 bis 2015 wird mittels der folgenden Formel eigens abgeleitet.

$$K_{PS} = \frac{GK_{PS}}{PS} \quad (8.19)$$

Wobei GK_{PS} die Gesamtkapazität der von DHL zur Verfügung gestellten Packstationen und PS die Anzahl der Packstationen in Deutschland pro Jahr ist. Damit kann der Initialwert für K_{PS} für die Startzeit 2009 von 76 Paketen pro Packstation bestimmt werden. Die Entwicklungsraten für $\rho_{K,PS}$ wurden nach der Formel (6.2) berechnet. Daraus konnte der Mittelwert von $\rho_{K,PS}$ für den Zeitraum von 2009 bis 2015 ermittelt werden.

Hinsichtlich der Aufbewahrungszeit des Pakets in einer Packstation \bar{t}_{AZ} hat ein Privatkunde zur Abholung seines Pakets 9 Tage zur Verfügung, bevor dieses Paket wieder in Retour geht. In der vorliegenden Arbeit wird angenommen, dass ein Paket von der Packstation im Durchschnitt nach 4,5 Tagen vom Privatkunden abgeholt wird.

MVS

Wie in Kapitel 6.2 zur Parametrisierung der MVS beschrieben wurde, wurden die Packstationen in Berlin erhoben und liegen in georeferenzierter Form vor. Zur Erhebung der Standorte der Packstationen wurden die Datenquellen von [36, 45, 80, 114, 123] herangezogen. Ihre Positionen sind in der synthetischen Welt dementsprechend als Knoten V durch eine x- und y-Koordinate definiert. (siehe Abbildung 6.2c) Jeder dieser Knoten besitzt darüber hinaus die Eigenschaft maximale Kapazität pro Packstation $K_{PS,MVS}$ [PE/PS] (vgl. Kapitel 8.1.1).

Zur Initialisierung der MVS werden die Initialwerte der Parameter Anzahl der Packstationen PS und maximale Kapazität pro Packstation $K_{PS,MVS}$ für das Jahr 2009 extern vorgegeben.

- Anzahl der Packstationen PS : 147 [PS]
- Maximale Kapazität pro Packstation $K_{PS,MVS}$: 76 [PE/PS]

Die Werte entstammen den Daten der Deutschen Post DHL Group [35]. Nähere Informationen zur Aufbereitung der verfügbaren Daten finden sich in Kapitel 8.2.1 zur Parametrisierung des Szenarios Packstationen im SD-Modell.

Im Kapitel 6.2 wurde bereits erwähnt, dass Privatkunden eine Auswahl zwischen verschiedenen Belieferungsformen haben (u. a. Hauszustellung, Lieferung zur Packstation, zum Paketshop oder zur nächstgelegenen Postfiliale). Diese werden exogen in der MVS definiert. Zu diesem Zweck werden die Anteile der jeweiligen Belieferungsformen für zwei Szenarien zur Maßnahme Packstation folgendermaßen definiert.

Für das Szenario 1 zur Packstation gelten dabei folgende externe Vorgaben.

- Hauszustellung: 0 %
- Lieferung zur Packstation: 100 %

Diese Werte beruhen auf eigenen Annahmen, um die Wirkungen bei 100 % Nutzung der Maßnahme seitens der Privatkunden abzuschätzen.

Hingegen wird das Szenario 2 zur Packstation mit den folgenden Werten parametrisiert.

- Hauszustellung: 77 %
- Lieferung zur Packstation: 23 %

Diese Werte wurden aus der Studie *Einkaufen 4.0* von der Deutschen Post DHL Group [34] herangezogen, die den Einfluss des E-Commerce auf die Lebensqualität und das Einkaufsverhalten privater Kunden untersucht. Im Rahmen der Studie wurde eine quantitative Befragung potentieller DHL-Privatkunden in Deutschland, Österreich und der Schweiz durchgeführt. In Deutschland belief sich die Stichprobe n auf 583 Privatpersonen. Davon waren 132 Privatpersonen bereits Packstation-Kunden. [34, S. 64]

8.2.2. City-Maut

Im folgenden Abschnitt werden die Szenarien Distanzabhängige Maut und Cordon-Maut parametrisiert.

SD-Modell

Zur Parametrisierung dieses Teilmoduls wurden die Datenquellen von Leih et al. [97] und von der SVG Straßenverkehrs-Genossenschaft Sachsen und Thüringen eG [156] verwendet. Bisher existiert in deutschen Kommunen kein gesetzlicher Rahmen, um eine City-Maut einzuführen. Aus diesem Grund können keine direkten Erfahrungswerte aus der deutschen Praxis herangezogen werden. Jedoch besteht seit 2005 eine LKW-Maut auf deutschen Bundesautobahnen, die von der Länge der Strecke, Anzahl der Achsen, Schadstoffklasse und Gesamtmasse abhängig ist. [21] Sie gilt seit 2005 für LKW ab 12 Tonnen zul. GG und seit 2015 für LKW ab 7,5 Tonnen zul. GG. Seit 2005 wurden die Mautsätze bereits viermal angepasst (u. a. 2007, 2008, 2014, 2015).

Für dieses Szenario werden die von der SVG Straßenverkehrs-Genossenschaft Sachsen und Thüringen eG [156] zur Verfügung gestellten Mautsätze der LKW ab 12 Tonnen zul. GG von 2005 bis 2015 verwendet und deren jeweiliges Minimum über alle Emissionsklassen und Achsentypen bestimmt.

Basierend darauf können die Entwicklungsraten des distanzabhängigen Mautpreises ρ_{DM} pro Jahr nach der Formel (6.2) berechnet werden.

Zur Ableitung der mittleren Veränderungsrate von $\bar{\rho}_{DM}$ zwischen 2005 und 2015 wird der Mittelwert der einzelnen Raten dieses Zeithorizonts gebildet. Als Initialwert für den distanzabhängigen Mautpreis pro km DM wird der Mautsatz für LKW ab 7,5 Tonnen zul.

GG genutzt, da es sich um den geringsten Wert im Vergleich zu den weiteren Mautsätzen handelt. Dieser gilt für die Mautkategorie A, Emissionsklasse EURO 6 und 2-achsige Fahrzeuge. In diesem Fall beträgt der Mautsatz 0,081 €/km. (siehe SVG [156])

Leih et al. [97] setzen sich mit bereits implementierten City-Mautkonzepten in den Städten Stockholm, London und Mailand auseinander und beschreiben deren jeweilige Charakteristika. In diesem Zuge vergleichen sie diese drei Konzepte anhand der folgenden Merkmale.

- Einführung der City-Maut
- Mautgebühren
- Erhebungsform
- Erfasste Fahrzeugtypen
- Gebietsgröße der Mautzone
- Ausnahmeregelungen
- Zielsetzung
- Ökologische Effekte
- Einnahmeverwendung

Die drei Beispielstädte betreiben eine Cordon-Maut, d. h. eine gebietsbezogene Maut. Die Mautsätze bei der Einführung der Cordon-Maut werden im Folgenden dargelegt.

- Stockholm: 6,15 €/Tag (2007)
- London: 5,69 €/Tag (2005)
- Mailand: 5,00 €/Tag (2012); (Lieferverkehr: 3 €/Tag)

Für das vorliegende Szenario wird angenommen, dass die Logistikdienstleister im Jahr 2009 6 €/Tag für die Einfahrt in die Mautzone entrichten müssen.

Zudem wird bestimmt, dass die mittlere Veränderungsrate des Cordon-Mautpreises $\bar{\rho}_{CM}$ denselben Wert wie die Veränderungsrate $\bar{\rho}_{DM}$ einnimmt.

Basierend auf diesen aufbereiteten Daten wurden die beiden Submodule zur Cordon-Maut und Distanzabhängigen Maut parametrisiert.

In der Tabelle A.10 wird die Charakterisierung der Zustandsvariablen (Z) und Konstanten (K) nach ihren jeweiligen Charakteristika aufgezeigt.

MVS

Wie bereits in Kapitel 8.1.3 zur Formalisierung des Szenarios *Cordon-Maut* erwähnt wurde, wird in der MVS die Cordon-Maut im Netzwerk hinterlegt. Das veränderte Netzwerk wird von Rieser [124] herangezogen, das für Berlin vorliegt. Die Kanten $E_{i,CM}$, die die Cordon-Mautzone — in diesem Fall die Umweltzone von Berlin — abgrenzen, werden darin definiert. Wenn die Fahrzeuge diese Kanten überqueren, fallen dafür Cordon-Mautkosten pro Tag und LKW CM an. Die Kanten innerhalb dieser Zone bleiben davon unberücksichtigt. Diese Kosten CM sind mit einem Wert hinterlegt, der in der vorliegenden Arbeit vom SD-Modell je Adapteriteration angepasst wird. Wie bereits zuvor in Kapitel zur Parametrisierung des SD-Submoduls Cordon-Maut, wird auch der Initialwert der Cordon-Maut pro Tag und LKW CM zur Initialisierung der MVS für das Jahr 2009 auf 6 €/Tag gesetzt.

Auch für das Szenario *Distanzabhängige Maut* steht ein angepasstes Infrastrukturnetzwerk für Berlin von Rieser [124] zur Verfügung (siehe Kapitel 8.1.2). Hierbei sind die Kanten des Netzwerks $E_{i,DM}$, die innerhalb der Umweltzone und dementsprechend in der Mautzone von Berlin liegen, als Mautabschnitte definiert. Dementsprechend besitzen diese Kanten neben den üblichen Eigenschaften (u. a. Länge, Geschwindigkeit bei freier Fahrt, Kapazität, Anzahl der Spuren) zudem die Spezifikation als Mautstrecke. Dazu werden für die selektierten Kanten die distanzabhängigen Mautkosten pro Meter DM_{MVS} hinterlegt. Demzufolge fallen die Gebühren DM_{MVS} für die zurückgelegte Distanz innerhalb der Mautzone an. Der Initialwert des distanzabhängigen Mautpreises pro Meter DM von 0,081 €/km (siehe SVG [156]) wird wie bereits zur Parametrisierung des SD-Submoduls Distanzabhängige Maut zur Initialisierung der MVS für das Jahr 2009 genutzt. Zu diesem Zweck wird dieser Wert in €/m umgerechnet. Damit liegt der Initialwert von DM_{MVS} bei 0,000081 €/m.

8.3. Kalibrierung

In diesem Abschnitt werden die Kalibrierungsergebnisse der Szenarien präsentiert. Zu diesem Zweck wurden die optimalen Werte für die folgenden Konstanten im Rahmen des Powell-Verfahrens gesucht.

- Entwicklungsrate Packstationen ρ_{PS}
- Entwicklungsrate Kapazität pro Packstation $\rho_{K,PS}$
- Entwicklungsrate distanzabhängiger Mautpreis ρ_{DM}
- Entwicklungsrate Cordon-Mautpreis ρ_{CM}

Für den Zeitraum von 2009 bis 2015 werden die Entwicklungsraten zu ρ_{PS} , $\rho_{K,PS}$, ρ_{DM} und ρ_{CM} optimal eingestellt. Wie bereits in Kapitel 8.2 beschrieben, wurden die Modellparameter für die initiale Simulation mittels der Mittelwertbildung der Zeitreihenwerte von 2009 bis 2015 gebildet.

Tabelle 8.1.: Auswertung der Kalibrierung der Szenarien.

Beschreibung	P	R^2	RMSE	MAE	MAPE	MAEoM
Anzahl der Packstationen	PS	0,86082	2,37152	1,79035	1,17984	1,16364
Kapazität pro Packstation	K_{PS}	0,92009	1,53073	1,22411	1,42495	1,44889
Distanzabhängige Maut pro km	DM	0,46990	0,00915	0,00696	7,69352	7,84924
Cordon-Maut pro Tag und Fz	CM	0,46990	0,67751	0,51536	7,69352	7,84924

Die Kalibrierung hat nach 140 Iterationsläufen einen maximalen Payoff von -58,9846 erreicht. Im Vergleich zum initialen Suchpunkt des 1. Simulationslaufes, bei dem ein Payoff von -65,9821 erzielt wurde, hat der Kalibrierungsprozess die Simulationsergebnisse um 10,6 % verbessert.

Die Tabelle B.9 zeigt die jeweiligen zu optimierenden Konstanten des Modells mit dem bestimmten Wertebereich, Minimum (MIN) und Maximum (MAX), für die Suche im Parameterraum. Zudem beinhaltet die Tabelle die resultierenden optimierten Werte (OW) der jeweiligen Parameter, die zur optimalen Einstellung der finalen Szenarien genutzt werden.

In der Tabelle 8.1 werden die Kalibrierungsergebnisse anhand von verschiedenen statistischen Maßzahlen bewertet. Hinsichtlich des Bestimmtheitsmaßes R^2 ist ein deutlicher linearer Zusammenhang bei den Parametern PS und K_{PS} erkennbar. Der Wert von R^2 für CM und DM liegt bei ca. 0,5 und ist in diesem Zuge zufriedenstellend. Die mittlere Abweichung $MAPE$ beträgt bei PS annähernd 1,2 % und bei K_{PS} knapp über 1,4 %. Damit sind diese als sehr gering einzustufen. Höhere Abweichungen sind bei CM und DM festzustellen, die an Schwankungen im Entwicklungsverlauf der historischen Zeitreihenwerte im Vergleich zu den Simulationsergebnissen liegen können.

In der Tabelle B.10 werden im Vergleich die historischen Zeitreihenwerte sowie die Simulationsergebnisse vor und nach der Kalibrierung gezeigt. Zudem werden die jeweiligen Abweichungen pro Jahr hinterlegt.

9. Auswertung der Simulationsergebnisse

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse des zuvor präsentierten Basisszenarios (siehe Kapitel 5, 6 und 7) im Vergleich zu den Ergebnissen der entwickelten Maßnahmenzenarien (siehe Kapitel 8) analysiert und kritisch diskutiert. Dazu werden für das Basisszenario die Simulationsergebnisse des Rückkopplungsansatzes mit denen des SD-Ansatzes gegenübergestellt. Der Analysezeitraum wird auf den zeitlichen Betrachtungshorizont von 2009 bis 2025 festgelegt. Dies bedeutet, dass das von 2009 bis 2015 kalibrierte SD-Modell Basis für eine Zukunftsprognose von insgesamt 10 Jahren darstellt. Der Rückkopplungsansatz startet zunächst die MVS mit den initialen Parameterwerten zum Zeitpunkt 2009. Im Folgenden werden die Parameter und Annahmen zum Basisszenario und den definierten Maßnahmenzenarien als Ausgangspunkt der Simulationen beschrieben.

Parameter und Annahmen zum Basisszenario Wie bereits in Kapitel 6.2 zur Parametrisierung der MVS dargelegt, befinden sich in der synthetischen Welt des Untersuchungsraums Berlin 31 Distributionszentren, 2.312 Abholstellen der KEP-Dienstleister (u. a. Paketshops und Postfilialen) sowie 19.019 Unternehmensstandorte, die sich von KEP-Dienstleistern beliefern lassen. Im Rahmen der Simulation verändern sich diese Werte nicht und werden somit als konstant gesetzt. Zur Initialisierung der Privatkunden in der MVS werden die Initialwerte n der Alterskohorten 1–9 der Gesamtpopulation für das Jahr 2009 bestimmt. Aus dem Produkt aus n und dem Anteil am E-Commerce je Alterskohorte $\alpha_{EC,i}$ ergeben sich die potentiellen Privatkunden der KEP-Dienstleister je Alterskohorte $n_{EC,i}$ (siehe Tabelle 9.1). Die auszuliefernden Pakete der Privatkunden werden an diese potentiellen Privatkunden zufällig verteilt.

Weitere Annahmen des Basisszenarios sind, dass die Privatkunden zu 100 % direkt nach Hause beliefert werden. Hierbei wird für die MVS extern vorgegeben, dass der KEP-Fahrer maximal zwei Pakete pro Stopp abgeben darf. Die Belieferung der Privatkunden sollte dabei innerhalb von sechs Stunden ausgeführt werden.

Direktbelieferung findet bei gewerblichen Kunden der KEP-Dienstleister grundsätzlich statt. Hierbei müssen nur die drei folgenden Belieferungszeitfenster berücksichtigt werden.

- 06:00 – 07:59 Uhr
- 08:00 – 09:59 Uhr
- 10:00 – 12:00 Uhr

Tabelle 9.1.: Initialisierung der Privatkunden.

i	AK	n	$\alpha_{EC,i}$ [%]	$n_{EC,i}$
1	0–9	287.290	0	0
2	10–19	273.114	6	163.868
3	20 – 29	506.652	37	187.461
4	30 – 39	494.311	27	133.464
5	40 – 49	591.014	15	88.652
6	50 – 59	453.684	9	40.832
7	60 – 69	398.706	2	7.974
8	70 – 79	294.306	2	5.886
9	≥ 80	143.598	2	2.872

Die Stoppzeitkonstante wurde mit 60 Sekunden und die Stoppzeitvariable mit 60 Sekunden pro Sendung definiert.

2009 sollen an einem typischen Tag 99.114 Pakete an private Kunden und 172.296 Pakete an gewerbliche Kunden ausgeliefert werden.

Die Charakteristika des KEP-Fahrzeugs werden für das Jahr 2009 initial mit den folgenden Werten parametrisiert.

- Zulässiges Gesamtgewicht: 3,5 t
- Maximale Kapazität k_T : 160 [PE/F]
- Fixe Kosten $c_{F,LKW,MVS}$: 47,52223942 [€/d]
- Variable Kosten $c_{L,m,MVS}$: 0,000317332 [€/m]
- Zeitabhängige Kosten bzw. Personalkosten $pk_{s,MVS}$: 0,003223249 [€/s]
- Kraftstoffverbrauch $\bar{k}v_{m,MVS}$: 0,000102952 [l/m]
- Adblueverbrauch $\bar{a}v_{m,MVS}$: 0 [l/m]
- Maximale Geschwindigkeit v_{max} : 42 m/s

Wobei die Werte der maximalen Kapazität und maximalen Geschwindigkeit konstant sind.

Der CO₂ Konversionsfaktor für Diesel $\beta_{1,D}$ wird mit dem Initialwert 2,629 kg/l und für Adblue $\beta_{1,A}$ mit dem Wert 0,238 kg/l extern definiert.

Für die Konversionsfaktoren $\beta_{i,a,MVS}$ der Emissionen CO, HC, NO_x und PM₁₀ werden die folgenden Initialwerte zur Berechnung der Emissionen vorgegeben.

- HC und NO_x Konversionsfaktor für Diesel $\beta_{2,D}$: 0,001044129 [g/m]
- CO Konversionsfaktor für Diesel $\beta_{3,D}$: 0,000278024 [g/m]
- PM₁₀ Konversionsfaktor für Diesel $\beta_{4,D}$: 0,000090275 [g/m]

Die Initialwerte wurden bereits in Kapitel 6.2 zur Parametrisierung der MVS aufgezeigt.

Parameter und Annahmen zu den Maßnahmenszenarien Im Folgenden werden die initialen Parameter der MVS zu den jeweiligen Maßnahmenszenarien präsentiert. Dabei handelt es sich um Erweiterungen des Basisszenarios. Die initialen Parameter der MVS für das Jahr 2009 und die formulierten Annahmen für das Basisszenario, die zuvor im Abschnitt 9 aufgezeigt wurden, bleiben bestehen, sofern keine neuen Nebenbedingungen für die Maßnahmenszenarien definiert werden. Im Folgenden werden die Parameter in Kürze zusammengefasst, die zur Initialisierung der MVS für das Jahr 2009 für die ausgewählten Maßnahmen Verwendung finden (siehe Kapitel 8.2).

Szenario 1 und 2: Packstationen Die Szenarien 1 und 2 zu den Packstationen werden jeweils mit 147 Packstationen PS in der synthetischen Welt der MVS mit einer jeweiligen Kapazität pro Packstation K_{PS} von 76 PE/PS initialisiert. Im Szenario 1 nutzen 100 % der Privatkunden die Belieferungsform Packstationen, im Gegensatz dazu werden in Szenario 2 23 % der Paketeinheiten privater Kunden zu Packstationen geliefert.

Szenario 3: Distanzabhängige Maut Der Initialwert des distanzabhängigen Mautpreises pro Meter DM_{MVS} liegt bei 0,000081 €/m.

Szenario 4: Cordon-Maut Der Initialwert der Cordon-Maut pro Tag und LKW CM zur Initialisierung der MVS für das Jahr 2009 beträgt 6 €/F.

Zunächst werden die Prognosen aus den Simulationsergebnissen der MEP und des Rückkopplungsansatzes gegenübergestellt und analysiert. Ferner wird eine asymptotische Analyse durchgeführt, die die zeitliche Entwicklung der Simulationsergebnisse mit verschiedenen Wachstumsklassen vergleicht. Hierbei wird überprüft, welcher Wachstumsklasse der jeweilige Entwicklungsgraph entspricht. Diese Wachstumsklassen lassen sich in lineare, exponentielle, logarithmische und polynomische Funktionen differenzieren. Die Wachstumsklassen wurden jeweils mittels des höchsten erreichten Bestimmtheitsmaßes R^2 bestimmt. Damit erlaubt die asymptotische Analyse die Klassifizierung des Systemverhaltens sowie die Beschreibung der Zukunftsprognose mittels Funktionen.

Zudem werden ausgewählte Simulationsergebnisse zu den Maßnahmenszenarien präsentiert. Dabei werden die relativen Abweichungen zum Basisszenario dargestellt und diskutiert. Konkret werden nur Ergebnisse von ausgewählten Variablen gezeigt, die im Durchschnitt um mehr als 1 % vom Basisszenario abweichen.

In den folgenden Abbildungen werden die Simulationsergebnisse des Basisszenarios mit B, die des SD-Modells mit SD und die der Szenarien mit S abgekürzt. Die Szenarien werden zudem fortlaufend nummeriert.

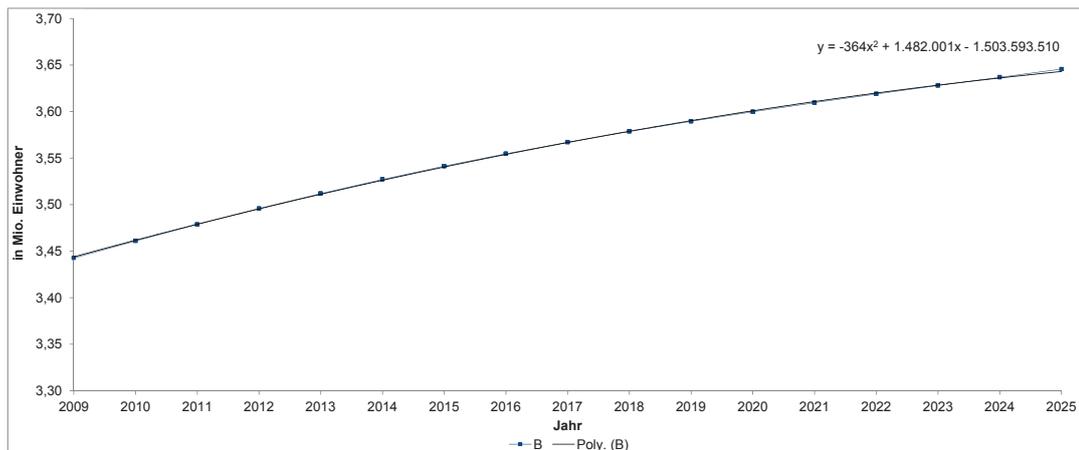


Abbildung 9.1.: Simulationsergebnisse zur Bevölkerungsentwicklung.

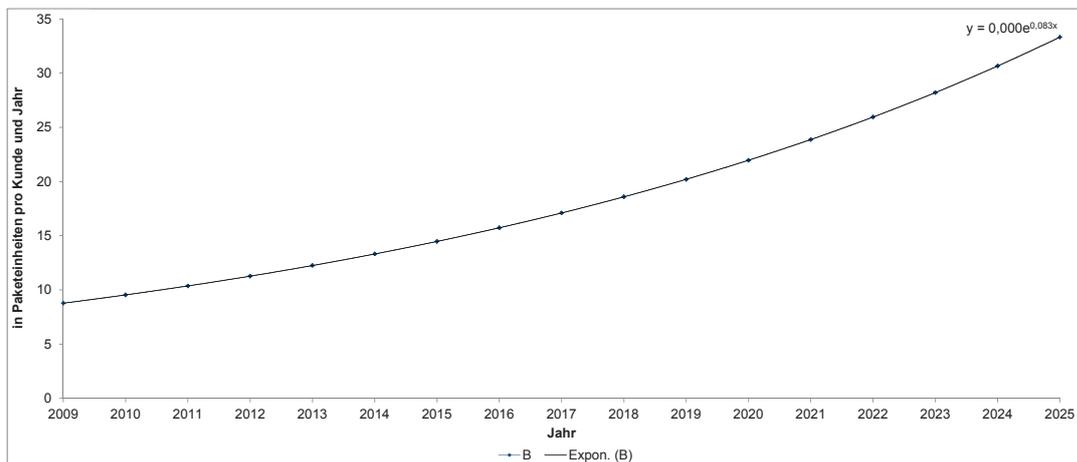
9.1. Bevölkerung

Zunächst wird die Bevölkerungsentwicklung von Berlin, die mittels der MEP extrapoliert wurde, bis 2025 dargestellt. In der Abbildung 9.1 wird der Entwicklungsverlauf der Bevölkerung b zwischen 2009 und 2025 gezeigt. Die Bevölkerung nimmt von 3,4 Millionen im Jahr 2009 auf 3,65 Millionen 2025 und damit um 5,9 % zu. Nach der asymptotischen Analyse entspricht die Bevölkerungsentwicklung einer quadratischen Funktion bzw. einer polynomischen Funktion 2. Grades. Diese quadratische Funktion zur Berechnung der kleinsten Quadrate wird auch in Abbildung 9.1 aufgezeigt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist dabei 1. Dies bedeutet, dass die Trendlinie eine sehr gute Annäherung für die Simulationsergebnisse ist.

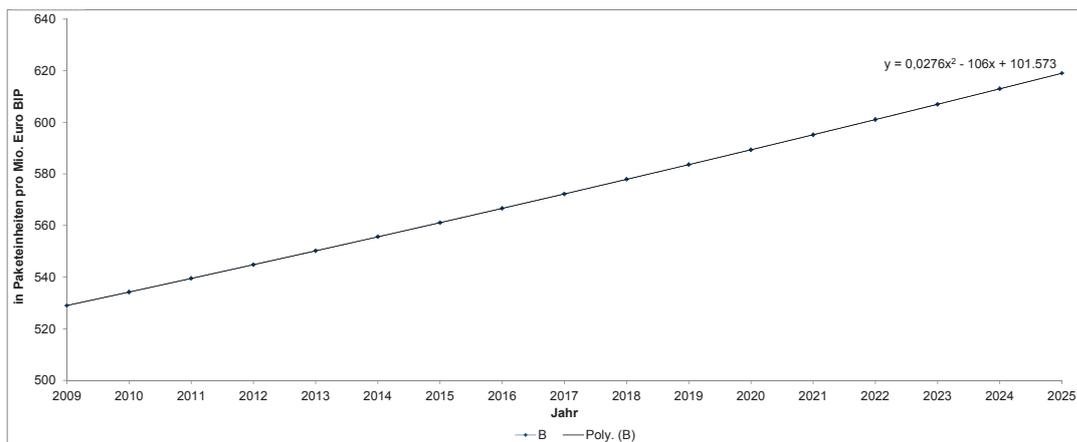
9.2. Güternachfrage

Im Folgenden wird auf die Simulationsergebnisse des Submoduls Güternachfrage näher eingegangen, das von der MEP von 2009 bis 2025 extrapoliert wird. Diese Ergebnisse haben maßgeblich Auswirkungen auf die Güterverkehrsnachfrage. Zunächst wird die Entwicklung der Güternachfrage pro Privatkunde GNK_p im Zeitraum von 2009 bis 2025 betrachtet. In der Abbildung 9.2a wird ein signifikanter Anstieg der GNK_p bis 2025 erkennbar. Die Güternachfrage pro Privatkunde nimmt demnach um 280 % von 8,8 Paketeinheiten pro Kunde 2009 auf 33,3 Pakete pro Kunde 2025 zu. Die Entwicklungskurve entspricht in diesem Fall einer exponentiellen Wachstumsfunktion. R^2 mit dem Wert 1 bestätigt den starken Zusammenhang der exponentiellen Trendlinie mit den Simulationsergebnissen.

Die Simulationsergebnisse der gewerblichen Güternachfrage pro Mio. € BIP GNK_o zeigen einen Anstieg für den Zeitraum von 2009 bis 2025 von 17 %. In Abbildung 9.4b wird zunächst ein linearer Wachstumsverlauf ersichtlic.



(a) Private Güternachfrageentwicklung pro Kunde.



(b) Gewerbliche Güternachfrageentwicklung pro Mio. € BIP.

Abbildung 9.2.: Simulationsergebnisse zur privaten Güternachfrage pro Kunde und zur gewerblichen Güternachfrage pro Mio. € BIP.

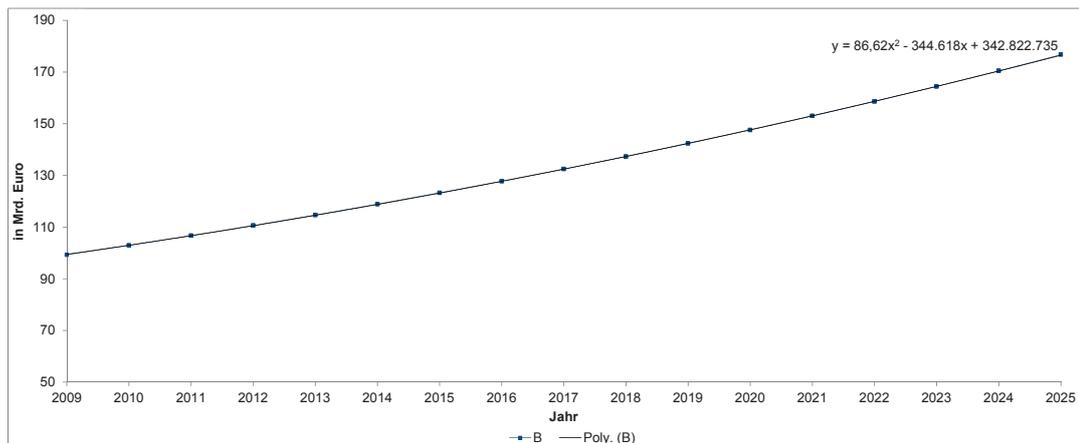
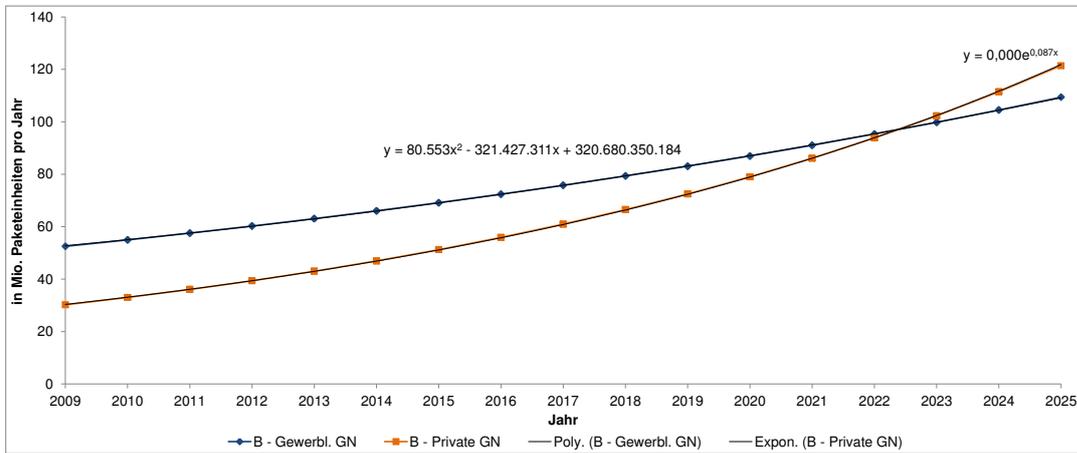


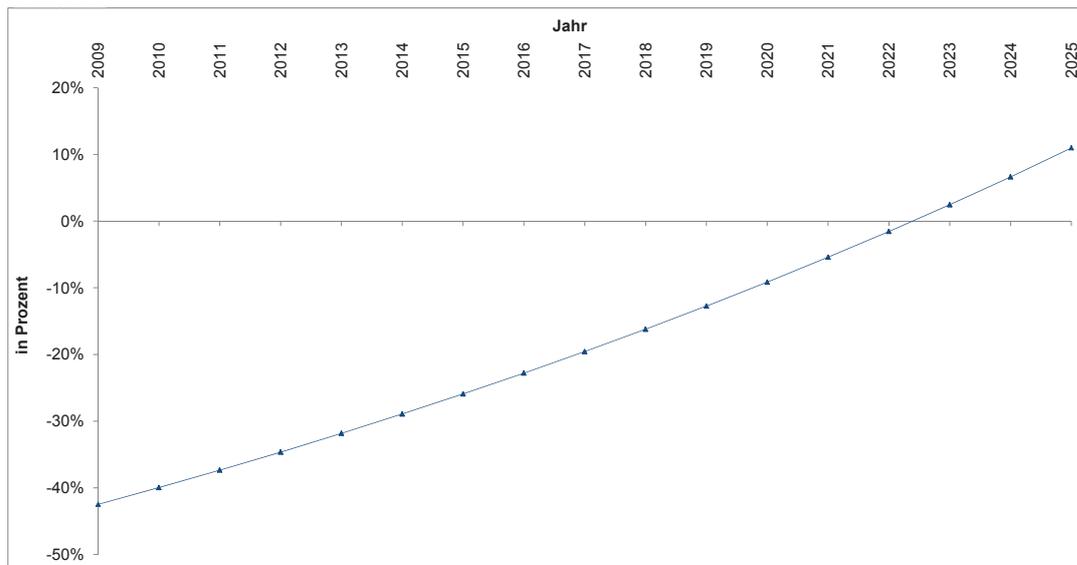
Abbildung 9.3.: Simulationsergebnisse zur Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts.

Bei genauerer Analyse lässt sich jedoch eine quadratische Wachstumsfunktion feststellen, die mittels R^2 mit einem Wert von 1 bestätigt wird. Nach den Simulationsergebnissen steigt das *BIP* von Berlin um 78 % an. Die Abbildung 9.3 zeigt den Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und der Trendlinie. Hierbei wird erkennbar, dass die Simulationsergebnisse einer quadratischen Wachstumskurve entsprechen. Dabei ist eine hohe Übereinstimmung zwischen der Entwicklung der Simulationsergebnisse und der Trendlinie zu verzeichnen, die mittels R^2 mit einem Wert von 1 hinterlegt wird.

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse zur Entwicklung der privaten gn_p und gewerblichen Güternachfrage gn_o in Abbildung 9.4a für den Zeitraum von 2009 bis 2025 gezeigt. Demnach werden bis 2022 im privaten Güternachfragesegment weniger Paketeinheiten pro Jahr nachgefragt als im gewerblichen Güternachfragesegment. 2023 schneiden sich jedoch die beiden Entwicklungsgraphen und die private Güternachfrage ist ab 2023 höher als die gewerbliche Güternachfrage. Dies liegt daran, dass die gewerbliche Güternachfrage ein geringeres Wachstum im Vergleich zur stark anwachsenden privaten Güternachfrage aufweist. Das prozentuale Wachstum liegt bei der gewerblichen Güternachfrage bei 108,3 % und bei der privaten Güternachfrage bei 301,9 % von 2009 bis 2025. Die Abbildung 9.4 verdeutlicht diese prozentuale Abweichung der Entwicklungsverläufe von gn_p und gn_o . Dabei liegt gn_p im Jahr 2009 noch unter -40% im Vergleich zu gn_o . Diese prozentuale Abweichung reduziert sich bis 2022 auf 0%. 2025 fällt gn_p bereits um ca. 11% höher als gn_o aus. Die mittlere prozentuale Abweichung (MAPE) zwischen gn_p und gn_o liegt dabei für den Zeitraum von 2009 bis 2025 bei 20,1 %. Die Berechnung von MAPE erfolgt mittels der Formel (3.13) (siehe Kapitel 3.1.2, S. 37). Das signifikant hohe Wachstum der privaten Güternachfrage wird zudem durch die asymptotische Analyse ersichtlich, die eine exponentielle Wachstumsfunktion zeigt. Dagegen nimmt die Entwicklung der gewerblichen Güternachfrage eher gleichmäßig und langsam zu. Bei der Wachstumskurve handelt es sich um eine quadratische Funktion. Der starke Zusammenhang der jeweiligen Simulationsergebnisse von gn_p und gn_o mit den Trendlinien wird jeweils mittels R^2 mit einem Wert von 1 bestätigt.



(a) Simulationsergebnisse zur Güternachfrageentwicklung.



(b) Relativer Unterschied der privaten und gewerblichen Güternachfrageentwicklung.

Abbildung 9.4.: Güternachfrageentwicklung.

9.3. Güterverkehrsnachfrage

Im Folgenden wird auf die Simulationsergebnisse der Güterverkehrsnachfrage gvn näher eingegangen. Hierbei werden die Ergebnisse der MEP und des Rückkopplungsansatzes gegenübergestellt analysiert. Zudem werden die prozentualen Abweichungen der Maßnahmenszenarien im Vergleich zum Basisszenario aufgezeigt.

In diesem Kontext muss zunächst erwähnt werden, dass dieses Submodul des MEP-Modells zur Simulation des Rückkopplungsansatzes leicht abgewandelt wurde. Hierbei wurde der Einfluss der Güterverkehrskapazität k_{GV} auf die ausgeführten Sendungen S nicht berücksichtigt, da im Vergleich zum MEP-Modell ohne Rückkopplung S nicht mehr in Tagesintervallen, sondern nur noch in Jahresintervallen angepasst wird. Demzufolge ist der formalisierte Zusammenhang der Formel zu S (5.21) in Abhängigkeit von k_{GV} in diesem Fall nicht realistisch. Aufgrund dessen wurde die Formel zu S (5.21) (siehe Kapitel 5.1.2) verändert (siehe Formel (9.1)).

$$S = \frac{A}{\tau} \quad (9.1)$$

wobei

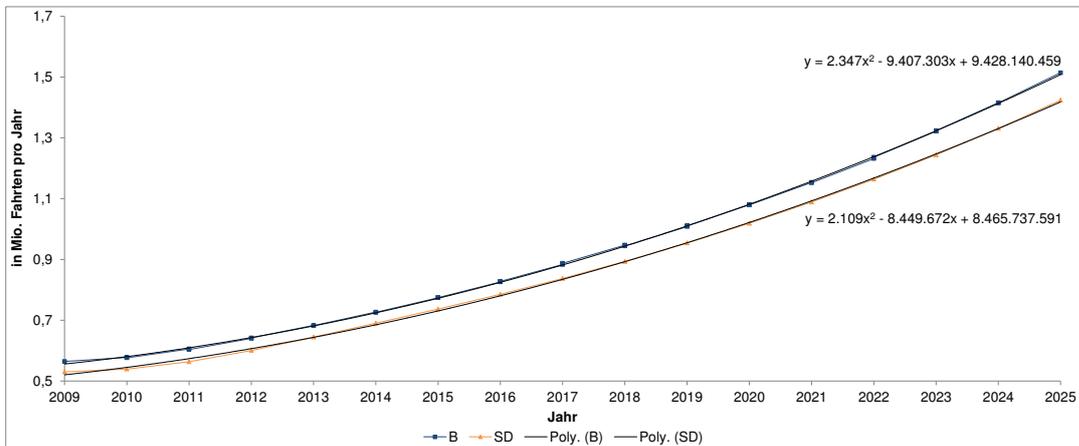
A = Auftragsbestand des LDL [PE]

Dementsprechend sind die ausgeführten Sendungen S nur vom Auftragsbestand des KEP-Dienstleisters abhängig, die pro Jahr ohne Einschränkungen ausgeführt werden.

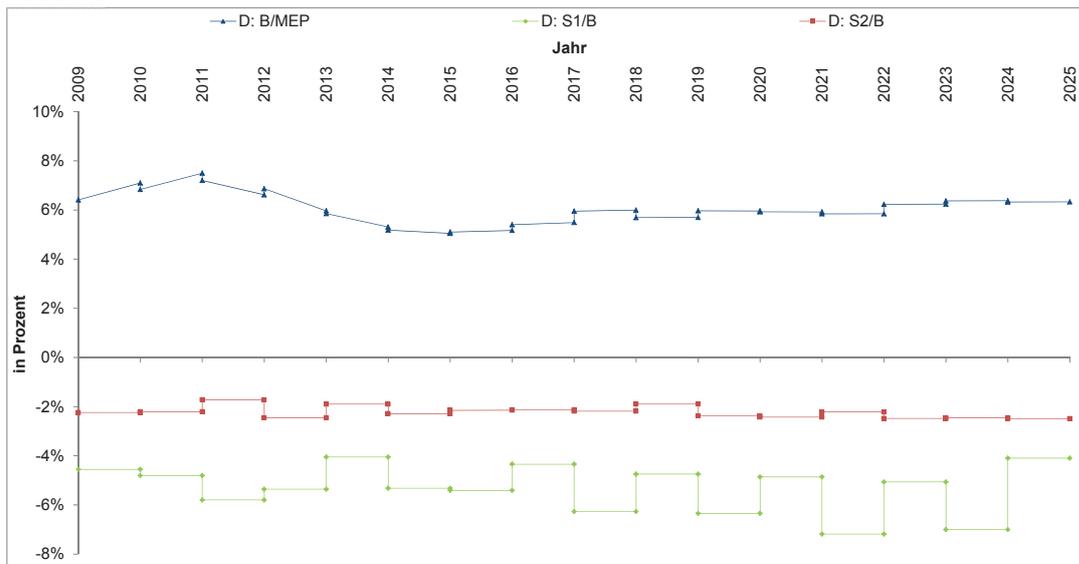
Abbildung 9.5a zeigt die Entwicklungskurven der MEP und des Rückkopplungsansatzes auf. Hierbei ist festzustellen, dass ein signifikantes Wachstum sowohl in der MEP als auch im Rückkopplungsansatz vorliegt. Die Güterverkehrsnachfrage nimmt sowohl in der MEP-Simulation als auch im Rückkopplungsansatz um über 168 % von 2009 bis 2025 zu. Nach der asymptotischen Analyse kann festgehalten werden, dass den beiden Wachstumskurven jeweils eine quadratische Funktion zugrunde liegt. Dies wird mittels R^2 mit einem Wert von 0,9997 für die MEP und mit einem Wert von 0,999 für den Rückkopplungsansatz bestätigt.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse der MEP und des Rückkopplungsansatzes zeigt, dass die Güterverkehrsnachfrage im Rückkopplungsansatz höher als in der MEP ausfällt. Hierbei wird der Einfluss der MVS auf die MEP bereits deutlich. Die MVS berücksichtigt die räumlichen Rahmenbedingungen bei der Belieferung. Insbesondere beeinflusst die Messgröße *Sendungen pro Tour* s_T , die pro Jahr von der MVS erhoben wird und die die MEP anpasst, die zeitliche Entwicklung von gvn . Hierbei wird berechnet, dass mehr Fahrten zur Auslieferung der Paketeinheiten benötigt werden, als dies die MEP prognostiziert. Die prozentualen Abweichungen der Simulationsergebnisse der MEP und des Rückkopplungsansatzes werden in Abbildung 9.5b im Detail aufgezeigt. Die durchschnittliche Abweichung zwischen der Prognose der MEP und des Rückkopplungsansatzes für den Zeitraum von 2009 bis 2025 liegt bei 6 %.

Abbildung 9.5b zeigt zudem die prozentualen Abweichungen der Maßnahmenszenarien im Vergleich zum Basisszenario des Rückkopplungsansatzes für den Zeitraum von 2009 bis 2025 auf.



(a) Simulationsergebnisse zur Güterverkehrsnachfrageentwicklung.



(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: Güterverkehrsnachfrage.

Abbildung 9.5.: Güterverkehrsnachfrageentwicklung.

Die Güterverkehrsnachfrage g_{vn} weicht in Szenario 1 von den Simulationsergebnissen des Basisszenarios um -4 bis -8 % ab. Die Entwicklungskurve der relativen Abweichung unterliegt dabei Schwankungen, die wiederum durch den Einfluss von s_T induziert werden. Falls demnach Privatkunden ihre Pakete nur noch zur Packstation liefern lassen, können somit im Durchschnitt 5,3 % an Fahrten pro Jahr eingespart werden. Die Abweichung des Szenarios 2 vom Basisszenario ist im Vergleich zu Szenario 1 geringer. Auch die Schwankungen des Entwicklungsgraphen sind abgeschwächer. Die mittlere prozentuale Abweichung von Szenario 2 zum Basisszenario beträgt 2,2 % bei einem Anteil von 23 % privater Nutzung der Packstationen.

9.4. Laufleistung und Kraftstoffverbrauch

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse zum Submodul Laufleistung und Kraftstoffverbrauch präsentiert. Fokus liegt hierbei auf der Auswertung der Variablen Laufleistung auf der Letzten Meile l_{LM} , Kraftstoffverbrauch kv und Adblueverbrauch av .

In Abbildung 9.6a wird die zeitliche Entwicklung der Laufleistung auf der Letzten Meile l_{LM} aufgezeigt. Die MEP prognostiziert ein Wachstum dieser Variablen von über 168 % bis 2025. Im Vergleich dazu wächst l_{LM} im Rückkopplungsansatz um 164,6 %. Diese prozentuale Abweichung des Wachstums bis 2025 ist zwar geringfügig, zeigt sich jedoch im Vergleich der beiden Entwicklungskurven. Hierbei wird ersichtlich, dass die MEP-Entwicklungskurve etwas steiler und die Werte von l_{LM} pro Jahr höher als die der Entwicklungskurve des Rückkopplungsansatzes ausfallen. Dies liegt am Einfluss der Messgröße *Transportdistanz pro Tour* d_T , die geringer ausfällt als der konstante Wert der MEP vorgibt.

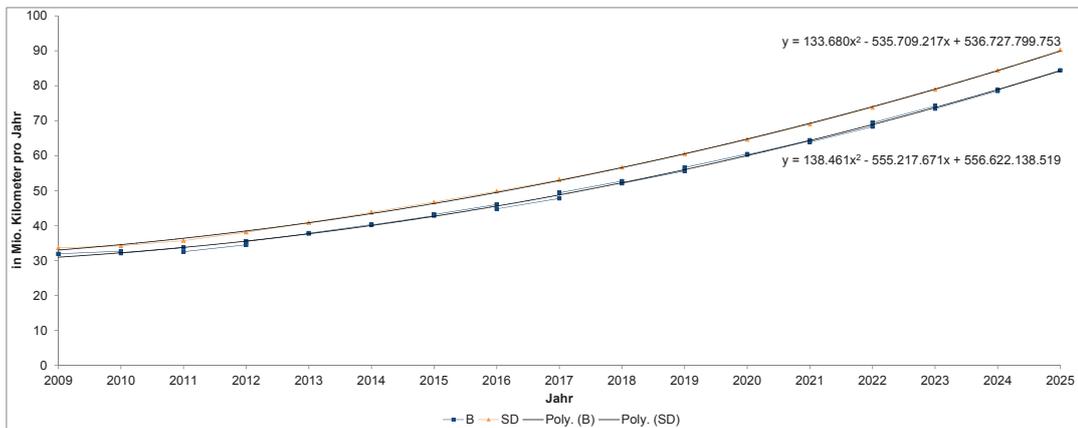
Beide Entwicklungsgraphen, sowohl der der MEP als auch der des Rückkopplungsansatzes, gehören zu der Wachstumsklasse Polynom 2. Grades. Dies wird durch die Werte von R^2 , die annähernd 1 betragen (für MEP: 0,9997; für Rückkopplung: 0,9989), bestätigt.

Die Abbildung 9.6b zeigt die prozentualen Abweichungen der Simulationsergebnisse der MEP und des Rückkopplungsansatzes. Wie zuvor bereits erläutert, liegen diese prozentualen Abweichungen und zeitlichen Schwankungen am Einfluss von d_T . Die mittlere prozentuale Abweichung beträgt für l_{LM} 7,2 %.

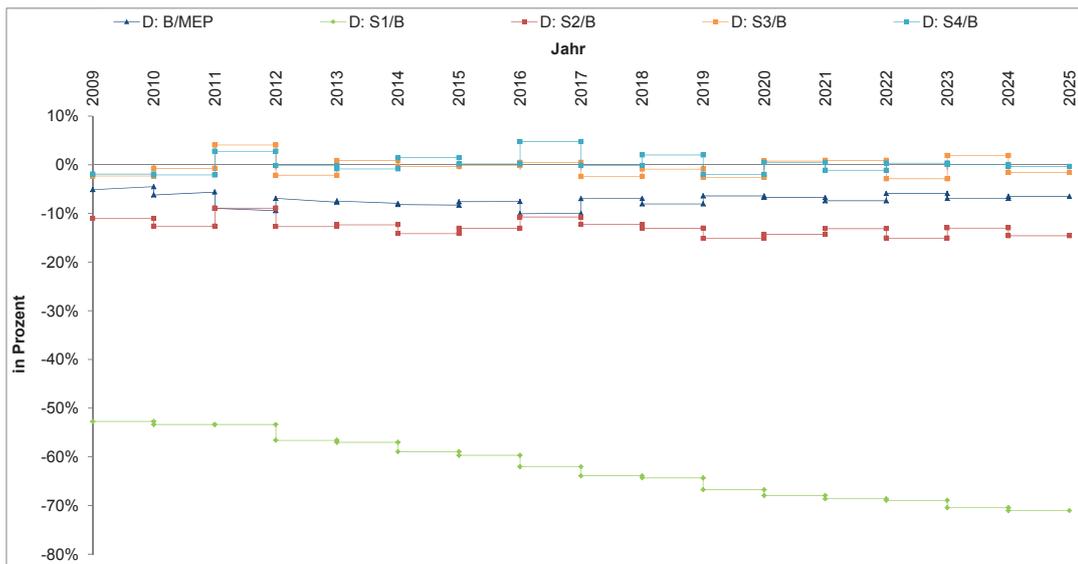
Die prozentualen Abweichungen der Simulationsergebnisse von l_{LM} der Maßnahmenzenarien zum Basisszenario werden in der Abbildung 9.6b gezeigt. Im Szenario 1 fällt l_{LM} 2009 um über 50 % geringer als im Basisszenario aus. 2025 liegt die Abweichung bereits bei annähernd -70 %. Die Abnahme von l_{LM} erfolgt stufenweise. Der Einfluss von d_T macht sich hierbei bemerkbar. Im Mittel werden in diesem Zeitraum 62,2 % der Laufleistung in der Stadt pro Jahr eingespart, Tendenz sinkend. Wird das Szenario 2 näher betrachtet, wird eine geringere Abweichung von unter -10 % erkennbar. Dennoch führt ein Anteil von 23 % privater Nutzung von Packstationen zu einer durchschnittlichen Reduzierung der Laufleistung von 12,9 %. l_{LM} weicht im Szenario 3 zur Distanzabhängigen Maut nur um durchschnittlich 1,6 % im Vergleich zum Basisszenario ab. Eine ähnlich geringe mittlere prozentuale Abweichung von 1,3 % resultiert für das Szenario 4 zur Cordon-Maut. Eine Erklärung für die geringen Abweichungen der Szenarien 3 und 4 im Vergleich zum Basisszenario ist, dass die Laufleistung l_{LM} nicht eingespart werden kann, da sowohl die privaten als auch die gewerblichen Kunden innerhalb der Mautzone versorgt bzw. beliefert werden müssen.

Ferner werden nun der Kraftstoff- kv und Adblueverbrauch av , die maßgeblich von l_{LM} abhängig sind, beleuchtet. Der Adblueverbrauch av wächst ab 2011 bis 2025 signifikant an. Bis 2010 wurde kein Adblue in den Dieselmotoren der LKW eingespritzt. Diese Möglichkeit bieten erst EURO 5- und EURO 6-Fahrzeuge seit 2011.

9. Auswertung der Simulationsergebnisse



(a) Simulationsergebnisse zur Laufleistung auf der Letzten Meile.



(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: Laufleistung auf der Letzten Meile.

Abbildung 9.6.: Entwicklung der Laufleistung auf der Letzten Meile.

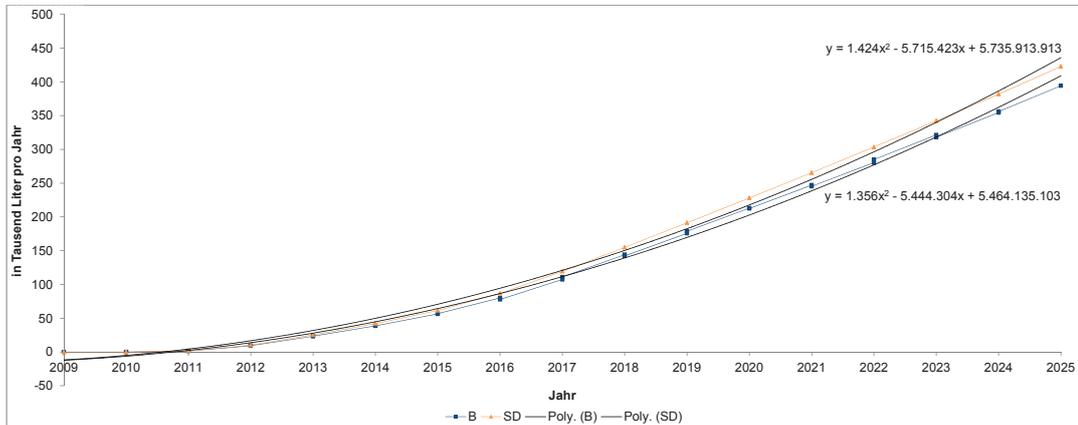
Beide Entwicklungskurven wachsen quadratisch an. Dieses Wachstumsverhalten wird mit R^2 von 0,997 sowohl für die MEP als auch für den Rückkopplungsansatz hinterlegt. Die Entwicklungskurve der MEP fällt jedoch etwas steiler als die des Rückkopplungsansatzes aus. Die prozentuale Abweichung zwischen den beiden Entwicklungsgraphen wird in der Abbildung 9.7b dargestellt. Die mittlere prozentuale Abweichung zwischen der MEP und des Rückkopplungsansatzes liegt bei 6,9 %.

Die relativen Abweichungen von av der Maßnahmenszenarien im Vergleich zum Basisszenario werden in der Abbildung 9.7b dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass av im Szenario 1 ab 2011 um unter -50 % von den Simulationsergebnissen des Basisszenarios abweicht. av sinkt bis 2025 stufenweise bis zu -70 % ab. Die mittlere prozentuale Abweichung beträgt für Szenario 1 57,2 %. Im Vergleich dazu schwankt die relative Abweichung von av im Szenario 2 um -10 % ab 2011 bis 2025. Im Durchschnitt ergibt sich daraus eine mittlere prozentuale Abweichung von 11,7 %. Die Distanzabhängige (S3) und die Cordon-Maut (S4) reduzieren av im Vergleich zum Basisszenario und zu den Szenarien 1 und 2 nur in sehr geringem Maße. Die Entwicklungskurven der relativen Abweichungen av der Szenarien 3 und 4 schwanken hierbei um -1 bis 1 % innerhalb des Betrachtungshorizonts. Im Mittel weicht av bedingt durch den Einfluss der Distanzabhängigen Maut um 1,4 % von den Simulationsergebnissen des Basisszenarios ab. Durch die Cordon-Maut ist eine mittlere prozentuale Abweichung von 1,1 % zu verzeichnen.

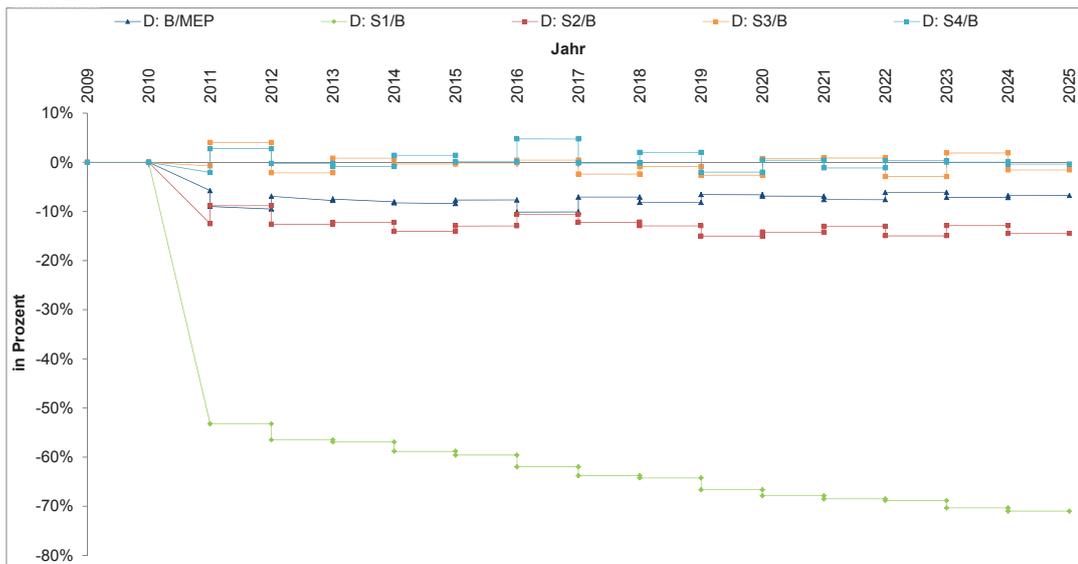
Auch der Kraftstoffverbrauch kv nimmt von 2009 bis 2025 sowohl in der MEP als auch im Rückkopplungsansatz stetig zu. Jedoch sind die Wachstumskurven gestreckter im Vergleich zu den Entwicklungskurven von av . Die MEP-Entwicklungskurve wächst um 144 %, die Entwicklungskurve des Rückkopplungsansatzes im Gegensatz dazu um 140,8 % bis 2025. Für den Zeitraum von 2009 bis 2025 fällt kv durchgängig geringer im Rückkopplungsansatz als in der MEP aus. Diese Differenz in den Entwicklungskurven wird nochmals in der Abbildung 9.8b verdeutlicht. Die mittlere prozentuale Abweichung zwischen den beiden Entwicklungsgraphen liegt hierbei bei 7,6 %. kv wächst in beiden Fällen quadratisch bis 2025 an. Die Werte von R^2 zeigen die hohe Übereinstimmung der quadratischen Funktion mit den jeweiligen Simulationsergebnissen (für MEP: 0,9995; für Rückkopplung: 0,9987).

Die relative Abweichung von kv im Vergleich der Maßnahmenszenarien zum Basisszenario wird in Abbildung 9.8b aufgezeigt. Ähnlich wie bei l_{LM} und av weicht kv in Szenario 1 um unter -50 % im Jahr 2009 bis annähernd -70 % 2025 vom Basisszenario ab. Die mittlere prozentuale Abweichung beträgt 62,1 %. Die relative Abweichung von kv im Szenario 2 schwankt innerhalb des Betrachtungshorizonts um -10 %. Im Durchschnitt resultiert eine relative Abweichung von 12,8 %. Die Simulationsergebnisse der Szenarien 3 und 4 weisen hingegen nur eine geringe Abweichung von 2009 bis 2025 im Vergleich zum Basisszenario auf. Szenario 3 weicht dabei durchschnittlich um 1,6 % und Szenario 4 um 1,3 % vom Basisszenario ab.

9. Auswertung der Simulationsergebnisse

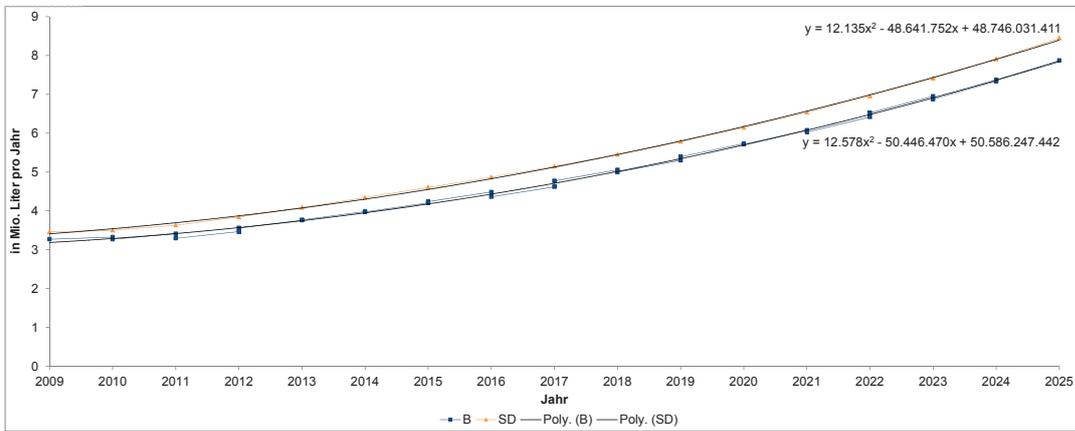


(a) Simulationsergebnisse zum Abblueverbrauch.

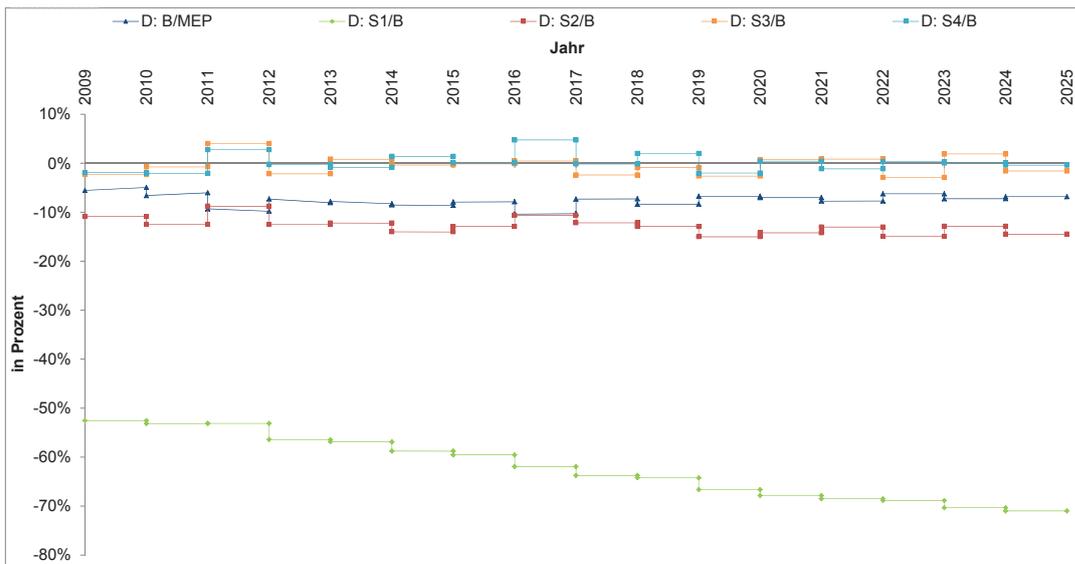


(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: Abblueverbrauch.

Abbildung 9.7.: Entwicklung des Abblueverbrauchs.



(a) Simulationsergebnisse zum Kraftstoffverbrauch.



(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: Kraftstoffverbrauch.

Abbildung 9.8.: Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs.

9.5. Flottenbestand

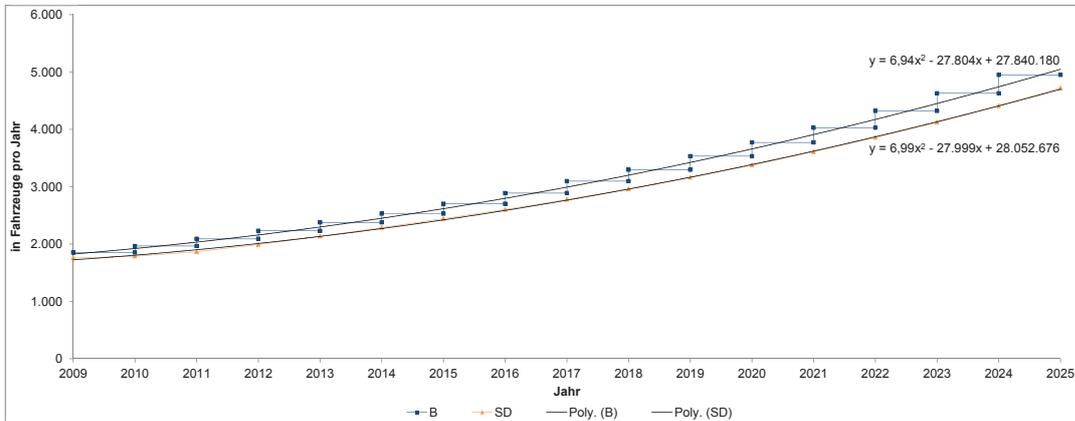
Weiterführend wird auf die Analyse der Entwicklung des Gesamtflottenbestands fb genauer eingegangen. Dabei wird fb mittels der MEP intern berechnet. Im Rahmen des Rückkopplungsansatzes liefert maßgeblich die MVS die Werte pro Jahr zu dieser Variablen. Daher wird zur Analyse vornehmlich der Initialwert des gesamten Flottenbestands FB_I herangezogen.

Zur Simulation des Rückkopplungsansatzes wurde das MEP-Modell dementsprechend angepasst. Im Vergleich zur Formalisierung des Transportdefizits bzw. der Angebotslücke fb_{TD} (siehe Formel (5.33) in Kapitel 5.1.2) gilt nun folgende Formel in der MEP für das Basisszenario. Hierbei wird ersichtlich, dass nicht wie zuvor fb auf das Transportdefizit rückgekoppelt einwirkt, sondern der Initialwert des gesamten Flottenbestands FB_I , der von der MVS pro Zeitintervall gemessen wird und zur Anpassung der MEP dient.

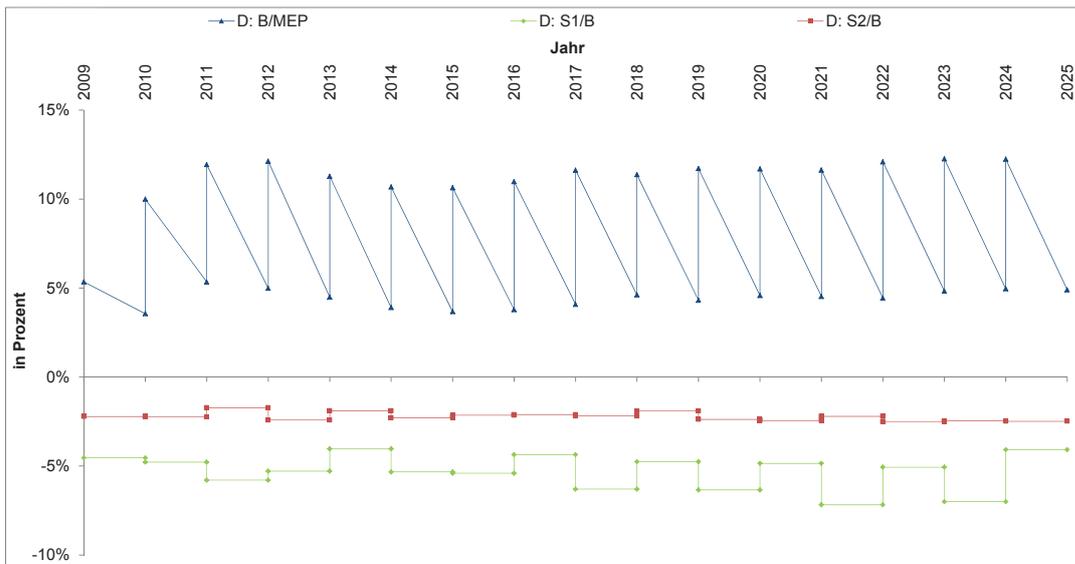
$$fb_{TD} = \frac{gvn_a}{n_{GT} - t_{IR}} - \frac{FB_I}{\tau} \quad (9.2)$$

Im Zeitraum von 2009 bis 2025 nimmt fb in der MEP um 168,5 % zu. Hingegen wächst FB_I um 167,4 %. Die Abbildung 9.9a zeigt, dass der Bedarf an Fahrzeugen im Rückkopplungsansatz innerhalb des gesamten Betrachtungshorizonts höher als in der MEP ausfällt. Die Anpassung des Flottenbestands im Rückkopplungsansatz erfolgt in 1-Jahres-Intervallen. Aus diesem Grund ergibt sich ein stufenförmiger Entwicklungsgraph. Die Analyse beider Entwicklungskurven weist auf ein quadratisches Wachstum hin. Sowohl in der MEP als auch im Rückkopplungsansatz wird das quadratische Wachstumsverhalten durch einen hohen Wert von R^2 bestätigt (für MEP: 0,9997; für Rückkopplung: 0,9872). Die mittlere prozentuale Abweichung zwischen den Simulationsergebnissen der MEP und des Rückkopplungsansatzes liegt bei 7,8 %. In Abbildung 9.9b wird der relative Abstand zwischen den Entwicklungsgraphen der MEP und des Rückkopplungsansatzes aufgezeigt. Die relative Abweichung von 2009 bis 2025 schwankt pro Jahr jeweils um ca. 5 %. Dies kann daran liegen, dass FB_I im Rückkopplungsansatz nur einmal pro Jahr von der MVS erhoben und in der MEP angepasst wird.

In der Abbildung 9.9b werden die relativen Abweichungen der Simulationsergebnisse der Maßnahmenszenarien zum Flottenbestand im Vergleich zum Basisszenario dargestellt. FB_I wird durch die private Nutzung der Packstationen zu 100 % innerhalb des Betrachtungszeitraums von 2009 bis 2025 um 4 bis über 7 % reduziert. Die Schwankungen der relativen Abweichungen pro Jahr sind im Zeitraum von 2009 bis 2015 noch relativ schwach, fallen danach bis 2025 stärker aus. Die mittlere prozentuale Abweichung beträgt 5,3 % für das Szenario 1 im Vergleich zum Basisszenario. Die Entwicklungskurve der relativen Abweichung von FB_I des Szenarios 2 zeigt eine geringere prozentuale Abweichung gegenüber dem Szenario 1. Auch die Schwankungen pro Jahr sind im Vergleich zur Entwicklungskurve von Szenario 1 sehr gering. Durchschnittlich weicht Szenario 2 um 2,2 % vom Basisszenario ab. Es können zwar Fahrzeuge zur Paketbelieferung an die Packstationen sowohl mit einer 100 % als auch mit einer 23 % Privatnutzung eingespart werden, jedoch fällt die Einsparung geringer als erwartet aus.



(a) Simulationsergebnisse zum Flottenbestand.



(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: Flottenbestand.

Abbildung 9.9.: Entwicklung des Flottenbestands.

9. Auswertung der Simulationsergebnisse

Dies liegt daran, dass die Standortdichte der Packstationen im Vergleich zur Standortdichte der Privatkunden relativ niedrig ist. Zudem ist zu berücksichtigen, dass nicht nur die Privatkunden und Packstationen, sondern auch die gewerblichen Kunden, die innerhalb der angegebenen Zeitfenster ihre Waren erhalten müssen, beliefert werden.

9.6. Tourencharakteristika und Transportzeit

Die Simulationsergebnisse zum Submodul *Tourencharakteristika und Transportzeit* werden im Folgenden dargestellt. In der MEP sind die meisten der Bestandteile dieses Submoduls Konstanten, u. a. Sendungen pro Tour s_T , Transportdistanz pro Tour d_T , Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} , durchschnittliche Stoppdauer \bar{t}_{st} , Dropfaktor B2C/C2C β_p und Dropfaktor B2B β_o . Im Rückkopplungsansatz dagegen sind die Bestandteile s_T , β , d_T , \bar{v} und \bar{t}_{st} Variablen, die je Zeitintervall von der MVS verändert bzw. angepasst werden. Dabei handelt es sich maßgeblich um die Messgrößen aus der MVS. Damit verändern diese Variablen die Entwicklung des Gesamtsystems. Die Stärke dieses Einflusses wird im Folgenden genauer untersucht.

Für die Rückkopplung wird das MEP-Modell im Vergleich zum Kapitel 5.1.2 marginal angepasst. Der *Dropfaktor* β wird nicht wie in Formel (5.43) intern vom MEP-Modell berechnet und ist dadurch nicht von der Entwicklung der privaten gn_p und gewerblichen Güternachfrage gn_o abhängig, sondern wird als Konstante definiert.

s_T – *Sendungen pro Tour* – ist im Gegensatz dazu keine Konstante in der MEP, sondern eine interne Variable, die durch Sendungen pro Tour B2C und C2C $s_{T,p}$ und Sendungen pro Tour B2B $s_{T,o}$ pro Zeitintervall verändert wird. Dementsprechend gilt folgende Funktion.

$$s_T = s_{T,p} + s_{T,o} \quad (9.3)$$

Wie bereits erwähnt, ist der Dropfaktor β in der MEP eine interne Variable, die von der Entwicklung der privaten gn_p und gewerblichen Güternachfrage gn_o abhängig ist. Die Entwicklungskurve der MEP zeigt einen schwachen Rückgang des Dropfaktors von 2,007 Paketeinheiten pro Stopp im Jahr 2009 auf 1,7858 Paketeinheiten pro Stopp 2025. Dies entspricht einem prozentualen Rückgang des Dropfaktors innerhalb dieses Zeitraums um -11 %. Im Vergleich dazu werden die Werte der Messgröße Dropfaktor im Rückkopplungsansatz direkt aus der MVS erhoben. Der Dropfaktor fällt dabei doppelt so hoch als in der MEP-Simulation aus. Der Dropfaktor liegt 2009 im Rückkopplungsansatz bei 3,8937 PE/St und sinkt bis 2025 auf 3,4785 PE/St. Der prozentuale Rückgang dagegen ist relativ ähnlich zu dem des MEP-Entwicklungsgraphen und liegt bei -10,7 %. Die Frage stellt sich nun, wieso die prozentuale Abweichung zwischen den Simulationsergebnissen der MEP und des Rückkopplungsansatzes im Durchschnitt bei 96,3 % liegt und innerhalb des Zeitraums von 2009 bis 2025 dieser Abstand relativ konstant bleibt (siehe Abbildung 9.10b). Dies liegt vornehmlich daran, dass in der MEP die definierten Werte der Konstanten β_p mit 1,15 PE/St und β_o mit 2,5 PE/St nach Bogdanski [16, 17], insbesondere die Werte von β_o , im Vergleich zu den Werten der MVS um einiges geringer sind. In der MVS wird ein maximaler Dropfaktor B2C/C2C β_p von 2 PE/St als externe Vorgabe definiert. β_o ergibt sich in der MVS aus dem Verhältnis aus der auszuliefernden Paketanzahl (gewerbliche Güternachfrage pro Tag) gn_o zur Anzahl der gewerblichen Kunden im Untersuchungsraum. Der durchschnittliche Dropfaktor B2B β_o wird dabei gleichmäßig an die gewerblichen Kunden verteilt. Daraus ergibt sich ein höherer Dropfaktor B2B im Vergleich zum konstanten Wert der MEP-Simulation.

Die Analyse beider Entwicklungsgraphen zeigt, dass der MEP-Entwicklungsgraph einem linearen Entwicklungsverlauf entspricht. Dieser lineare Zusammenhang der Trendlinie mit den Simulationsergebnissen wird mit R^2 von 1 hinterlegt. Der Entwicklungsgraph des Rückkopplungsansatzes weist hingegen ein quadratisches Entwicklungsverhalten auf. Dies ist zwar nur schwach, und die Öffnung der Kurve nach unten ist dabei stark gestreckt. Dennoch bestätigt R^2 mit einem Wert von 0,9867 die quadratische Funktion des Entwicklungsgraphen. (siehe Abbildung 9.10a)

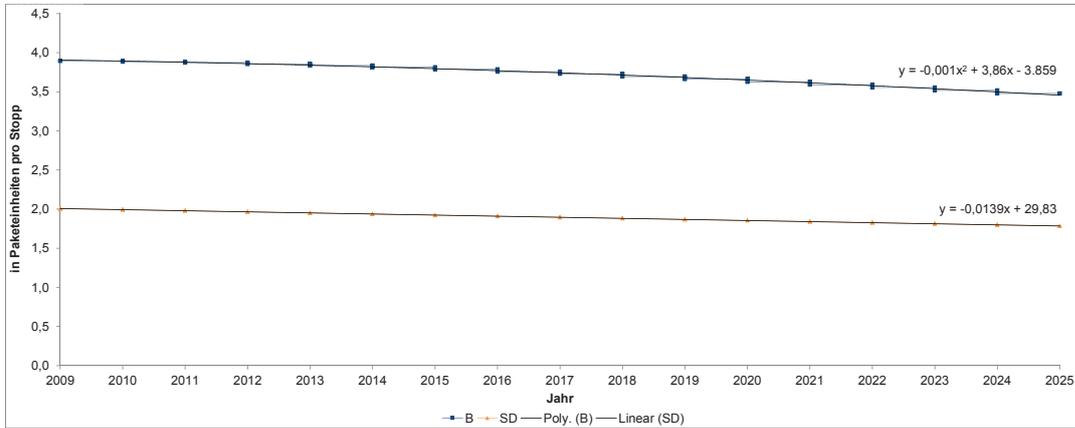
Der Dropfaktor β erhöht sich im Szenario 1 von 250 % 2009 bis zu 860 % 2025 im Vergleich zum Basisszenario. Die Anpassung der Entwicklungskurve von Szenario 1 erfolgt hierbei stufenweise. Die Simulationsergebnisse des Szenarios 1 weichen im Mittel 504,1 % vom Basisszenario ab. Hingegen weichen die Simulationsergebnisse des Szenarios 2 im relativen Vergleich zum Basisszenario um 18 bis 26 % von 2009 bis 2025 ab. Der relative Abstand der Entwicklungskurve nimmt in diesem Zuge bis 2025 stetig zu. Die mittlere prozentuale Abweichung beträgt in diesem Fall 22,5 %.

Der Wert der Konstanten durchschnittliche Sendungen pro Tour s_T liegt nach Bogdanski [17] bei 154,54 Paketeinheiten pro Fahrt [PE/F]. Hingegen schwankt der Wert des Parameters *Sendungen pro Tour* s_T , der pro Jahr aus der MVS erhoben wird, zwischen 145,8 und 147,4 PE/F im Zeitraum von 2009 bis 2025. Die Abbildung 9.11a zeigt diese Schwankung von s_T innerhalb des Zeitraums von 2009 bis 2025. Nach der asymptotischen Analyse weist der Entwicklungsgraph des Rückkopplungsansatzes auf ein polynomisches Entwicklungsverhalten 3. Grades mit zwei Krümmungen hin. Anhand der Trendlinie wird eine Öffnung nach unten zwischen 2009 bis 2017 und eine Öffnung nach oben von 2018 bis 2025 ersichtlich. Die Spitze der ersten Öffnung liegt bei 2013 und das Tal der zweiten Öffnung bei 2025. Der polynomische Entwicklungsverlauf 3. Grades von s_T wird mit R^2 von 0,8296 bestätigt.

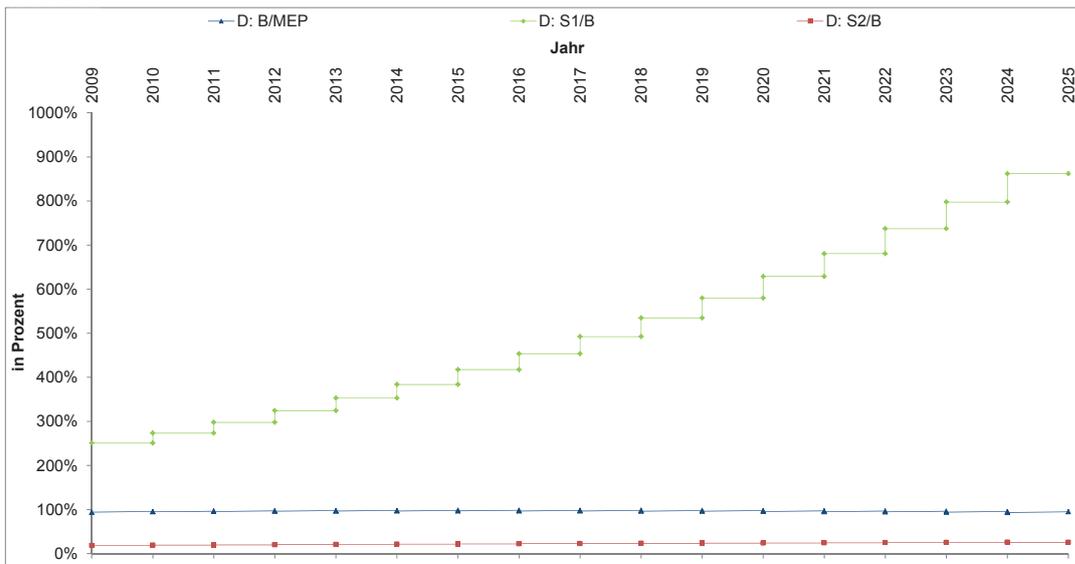
Die relativen Abweichungen der Simulationsergebnisse der Variablen Sendungen pro Tour s_T des Szenarios 1 zum Basisszenario schwanken innerhalb des Betrachtungshorizonts zwischen 4 bis 8 %. Die Schwankungen werden von 2009 bis 2025 zunehmend stärker. Im Mittel weicht Szenario 1 um 5,6 % zum Basisszenario ab. Die Schwankungen der Entwicklungskurve des relativen Abstands von Szenario 2 zum Basisszenario sind hingegen abgeschwächer als in Szenario 1. Zudem weichen die Simulationsergebnisse des Szenarios 2 nur um 2,3 % im Durchschnitt von denen des Basisszenarios ab. (siehe Abbildung 9.11b)

Der konstante Wert der Transportdistanz pro Tour d_T liegt nach Bogdanski [17] bei 63,4 km/F in Berlin. Im Rückkopplungsansatz wird der Parameter d_T von der MVS erhoben und damit die MEP pro Jahr angepasst. Der Entwicklungsgraph von d_T zeigt mehrere Schwankungen im Zeitraum von 2009 bis 2025. Die Werte liegen dabei zwischen 53,5 und 56,5 km/F. Die Analyse des Entwicklungsgraphen weist auf einen polynomischen Entwicklungsverlauf 6. Grades hin. Der Zusammenhang der erhobenen Daten aus der MVS mit der Trendlinie ist jedoch mit R^2 von 0,3293 sehr schwach. (siehe Abbildung 9.12a)

In Abbildung 9.12b werden die relativen Abstände der Transportdistanz pro Tour d_T der Maßnahmenszenarien zum Basisszenario dargestellt.



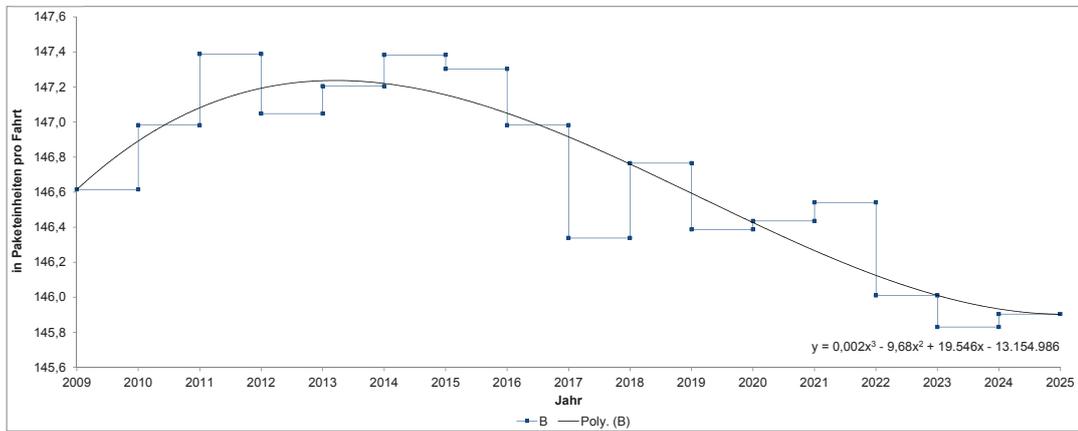
(a) Simulationsergebnisse zum Dropfaktor.



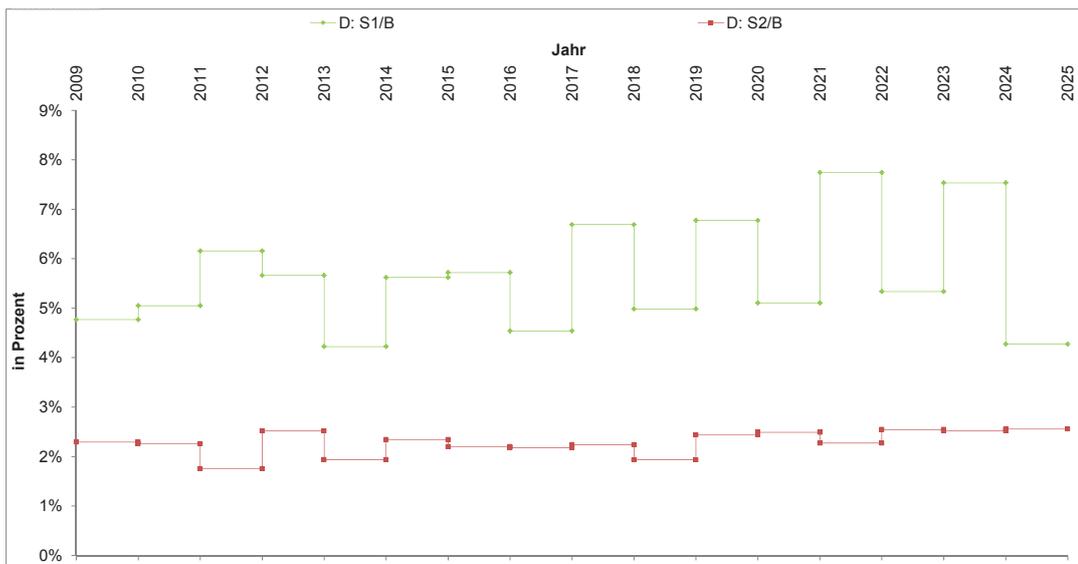
(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: Dropfaktor.

Abbildung 9.10.: Entwicklung des Dropfaktors.

9. Auswertung der Simulationsergebnisse

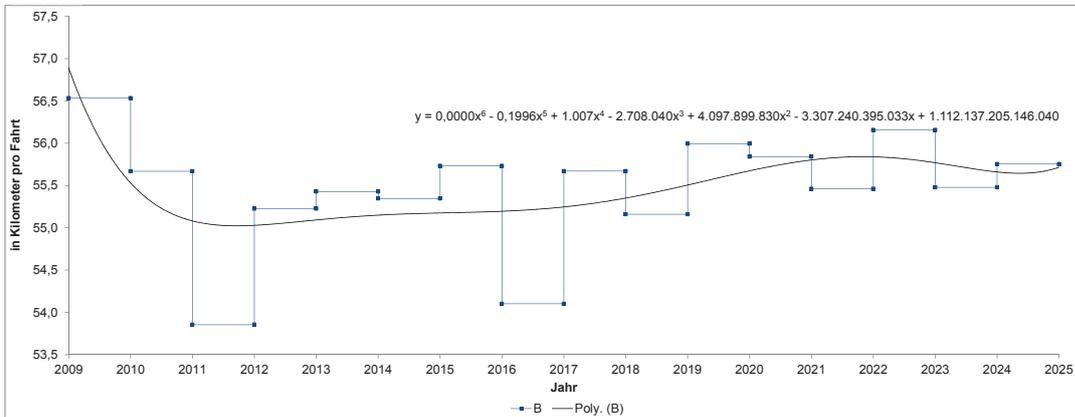


(a) Simulationsergebnisse zu Sendungen pro Tour.

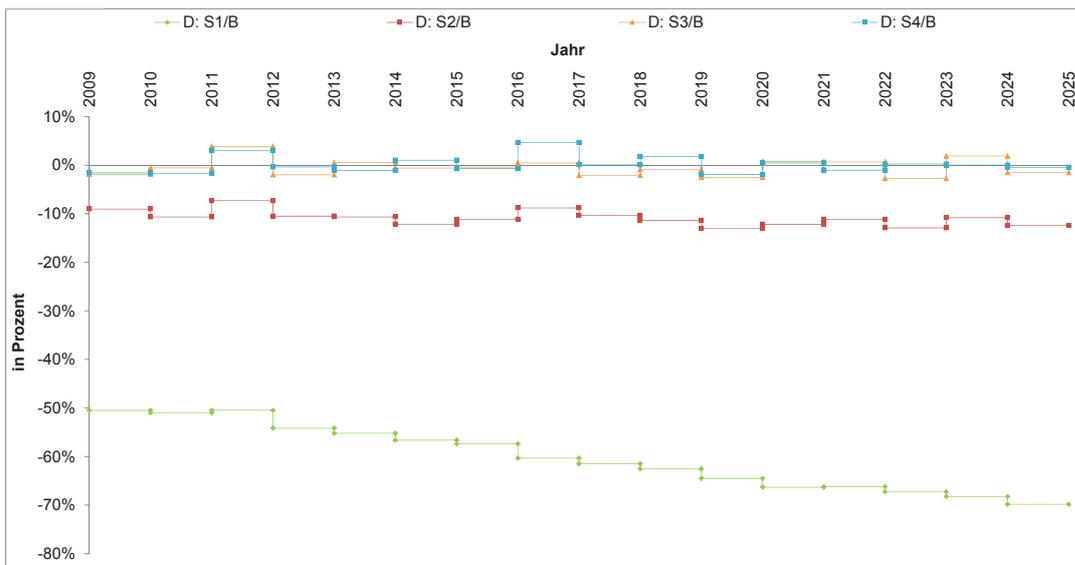


(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: Sendungen pro Tour.

Abbildung 9.11.: Sendungen pro Tour.



(a) Simulationsergebnisse zu Transportdistanz pro Tour.



(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: Transportdistanz pro Tour.

Abbildung 9.12.: Transportdistanz pro Tour.

Die relativen Abweichungen von d_T nehmen von annähernd -50 % im Jahr 2009 bis zu -70 % 2025 ab. Der mittlere prozentuale Abstand zwischen Szenario 1 zum Basisszenario beträgt 60,1 %. Dementsprechend werden die Fahrtweiten pro Tour im KEP-Segment durch die Maßnahme Packstationen kürzer, mit Tendenz sinkend bis 2025. Die relativen Abweichungen des Szenarios 2 zum Basisszenario schwanken von 2009 bis 2025 um -10 %. Im Mittel können 10,9 % Kilometer pro Tour durch eine Privatnutzung der Packstationen von 23 % eingespart werden. Die Einsparung an Wegelänge pro Tour d_T fällt im relativen Vergleich des Basisszenarios mit den Simulationsergebnissen der Distanz-abhängigen Maut (S3) und der Cordon-Maut (S4) im Gegensatz zu S1 und S2 relativ gering aus. Hierbei schwanken die beiden Entwicklungskurven von S3 und S4 um -1 bis 1 %. Die Simulationsergebnisse von Szenario 3 weichen im Durchschnitt um 1,5 % und im Szenario 4 um 1,3 % vom Basisszenario ab.

Die mittlere zu erreichende Geschwindigkeit \bar{v} liegt nach Forbes [111] bei 24,1402 km/h. Mit diesem Wert wird die Konstante \bar{v} in der MEP parametrisiert. Im Gegensatz dazu wird im Rückkopplungsansatz die Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} in der MVS erhoben und an die MEP zur Anpassung pro Jahr transferiert. In Abbildung 9.13 wird der Entwicklungsverlauf der Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} im Zeitraum von 2009 bis 2025 aufgezeigt. Dieser Wert schwankt in diesem Zeitraum nur geringfügig zwischen 24,36 und 24,54 km/h. Der Entwicklungsgraph weist einen polynomischen Entwicklungsverlauf 6. Grades auf. Der Wert von R^2 liegt hierbei bei 0,5548. Der Zusammenhang zwischen den erhobenen Daten und der Trendlinie ist damit befriedigend.

Die relativen Abstände zwischen den Szenarien 1 und 2 im Hinblick auf die Entwicklung der Durchschnittsgeschwindigkeit innerhalb des Betrachtungshorizonts sind zu vernachlässigen. Die Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} bleibt zwischen 2009 und 2025 relativ konstant. Dies liegt am hinterlegten Infrastrukturnetzwerk in der MVS, bei dem die Straßenkanten mit bereits niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeiten definiert sind (siehe Kapitel 6.2). Diese angenommenen, verminderten Geschwindigkeiten je Kante sollen den Widerstand im Netz simulieren, der stellvertretend für die Verkehrsbelastung durch den Personenverkehr steht. Die mittleren relativen Abweichungen betragen für Szenario 1 0,579 %, für Szenario 2 0,162 %, für Szenario 3 0,167 % und für Szenario 4 0,141 % im Vergleich zum Basisszenario.

Die durchschnittliche Stoppdauer \bar{t}_{st} beträgt nach Moder [109] 2,5 Minuten pro Stopp. In der MEP wird die Konstante \bar{t}_{st} mit diesem Wert, umgerechnet in h/St, parametrisiert (0,041667 h/St). Im Gegensatz dazu wird die durchschnittliche Stoppdauer \bar{t}_{st} im Rückkopplungsansatz durch die MVS erhoben. Dabei nimmt \bar{t}_{st} um -8,484 % von 2009 bis 2025 ab. Hierbei wird ein Rückgang von 4,8936 Minuten pro Stopp im Jahr 2009 auf 4,4784 Minuten pro Stopp 2025 verzeichnet. Der knapp doppelt so hohe Wert im Vergleich zum konstanten Wert der MEP lässt sich durch den doppelt so hohen Dropfaktor in der MVS erklären. Es werden in der MVS mehr Sendungen pro Stopp ausgeliefert, als es von Bogdanski [16] oder auch in der MEP-Simulation angenommen wird. Aus diesem Grund dauert der Aufenthalt an einem Stopp länger.

Der Entwicklungsverlauf des Graphen entspricht einer polynomischen Wachstumsfunktion 2. Grades. Somit nimmt \bar{t}_{st} quadratisch von 2009 bis 2025 ab.

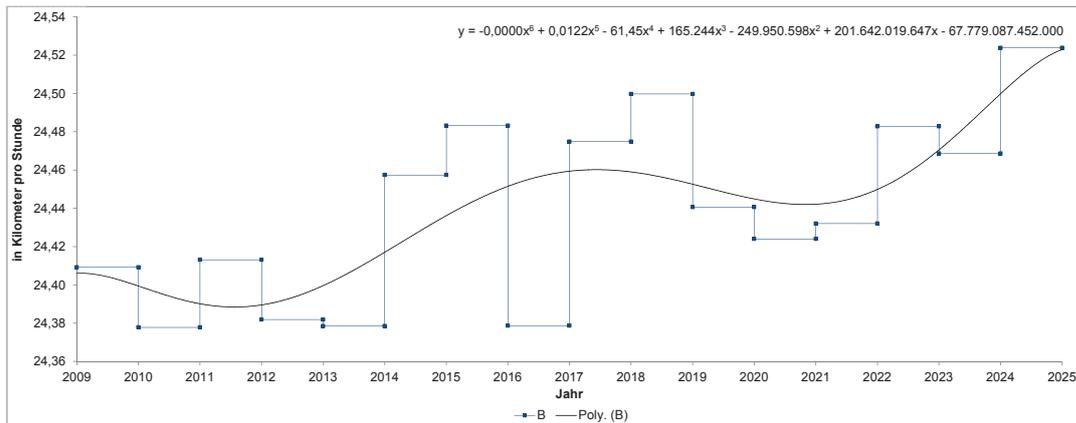


Abbildung 9.13.: Simulationsergebnisse zur Durchschnittsgeschwindigkeit.

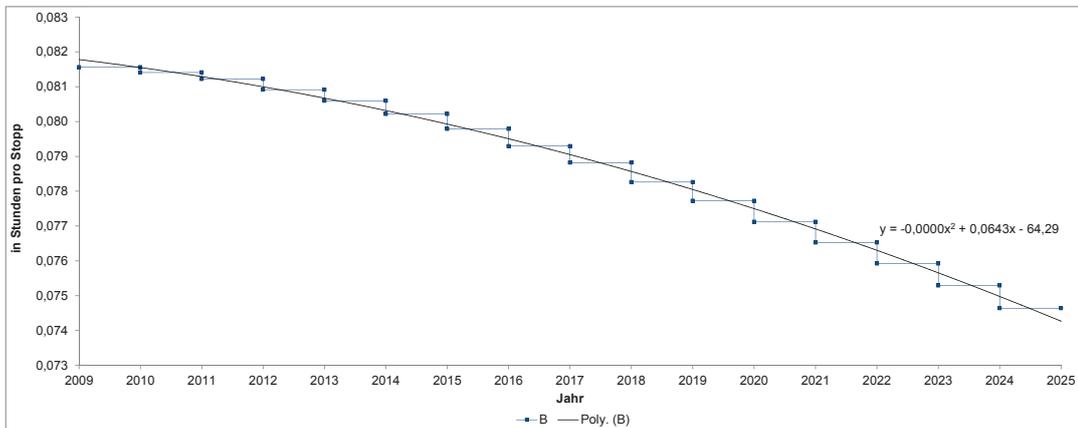
Das Negativwachstum wird durch eine Öffnung der Krümmung nach unten ersichtlich. Die hohe Übereinstimmung der erhobenen Daten und der Trendlinie wird durch R^2 mit einem Wert von 0,9867 bestätigt. Der stufenförmige Graph resultiert daraus, dass \bar{t}_{st} nur einmal pro Jahr durch die MVS erhoben wird. (siehe Abbildung 9.14a)

Im Vergleich zum Basisszenario erhöht sich die durchschnittliche Stoppdauer \bar{t}_{st} durch die Privatnutzung der Packstationen mit einem Anteil von 100 % im Szenario 1 gravierend. Bereits 2009 ist \bar{t}_{st} um 200 % höher als im Basisszenario. Die relativen Abstände der Simulationsergebnisse von \bar{t}_{st} des Szenarios 1 steigen bis 2025 stufenweise bis annähernd 670 % an. Im Durchschnitt liegt die prozentuale Abweichung bei 396,2 %. Dies liegt daran, dass sich die Anzahl der Sendungen pro Stopp, der Dropfaktor β , durch die Zustellung der Pakete an die Packstationen stark erhöht. Bei einem 23 % Anteil der Privatnutzung nimmt \bar{t}_{st} in geringerem Maße zu. Hierbei ist in Szenario 2 ein Anstieg des relativen Abstands von 15 % im Jahr 2009 bis zu 20 % 2025 im Vergleich zum Basisszenario zu verzeichnen. Im Durchschnitt ergibt sich eine prozentuale Abweichung von 17,7 %. (siehe Abbildung 9.14b)

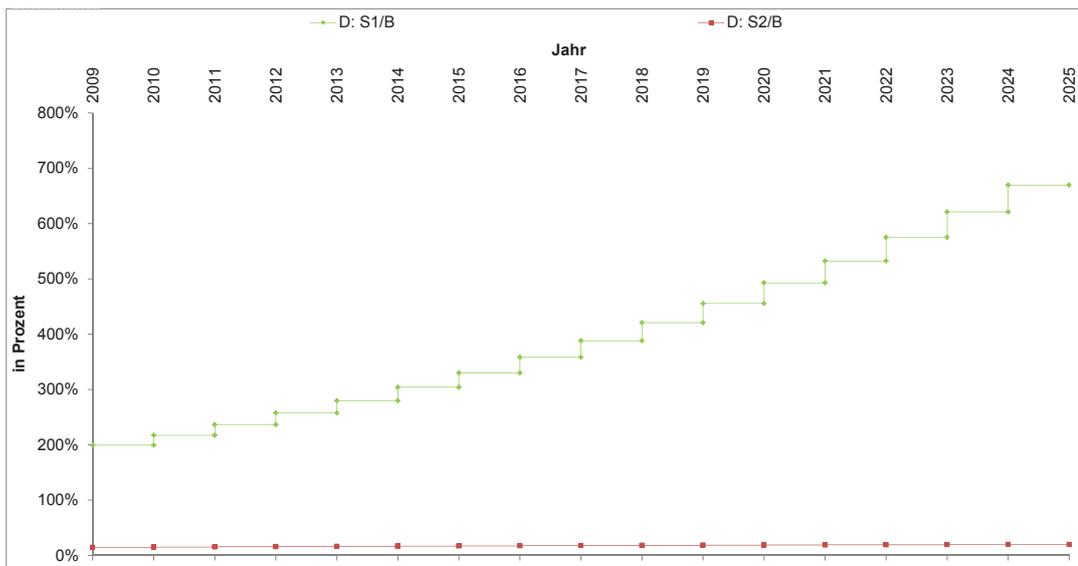
Die Variable Stopps pro Tour st_T wird sowohl in der MEP als auch im Rückkopplungsansatz intern berechnet. In Abbildung 9.15a werden die Entwicklungsgraphen zu st_T der MEP und des Rückkopplungsansatzes im Vergleich aufgezeigt. Beide Entwicklungsgraphen scheinen auf den ersten Blick einen linearen Entwicklungsverlauf von 2009 bis 2025 zu nehmen. Die asymptotische Analyse ergibt allerdings, dass es sich hierbei um quadratische Wachstumskurven handelt. Die jeweiligen Werte von R^2 bestätigen den starken Zusammenhang zwischen den Trendlinien und den Simulationsergebnissen (für MEP: 1; für Rückkopplung: 0,9858).

Die Entwicklungskurve der MEP nimmt von 2009 bis 2025 um 12,4 % zu, die Entwicklungskurve der Rückkopplung hingegen um 11,4 %. Sowohl in Abbildung 9.15a als auch in Abbildung 9.15b wird deutlich, dass st_T in der MEP-Simulation deutlich höher als im Rückkopplungsansatz ausfällt. Dies kann wiederum am Dropfaktor β liegen, der in der MEP deutlich niedriger als in der Rückkopplung ist.

9. Auswertung der Simulationsergebnisse



(a) Simulationsergebnisse zur Stoppdauer.



(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: Stoppdauer.

Abbildung 9.14.: Stoppdauer.

Dadurch ergeben sich in der MEP-Simulation deutlich höhere Werte für st_T im Vergleich zur Rückkopplung. Der prozentuale Abstand zwischen dem Rückkopplungsgraphen zum MEP-Graphen liegt zwischen 2009 bis 2025 annähernd konstant bei -50 %. Die mittlere prozentuale Abweichung beträgt in diesem Fall 51,6 %.

Die relativen Abstände der Simulationsergebnisse zu Stopps pro Tour st_T des Szenarios 1 liegen bereits 2009 bei annähernd -70 % im Vergleich zum Basisszenario. Bis 2025 reduzieren sich die Stopps pro Tour stufenweise bis zu -90 %. Die mittlere prozentuale Abweichung des Szenarios 2 zum Basisszenario beträgt 80,8 %. Im Hinblick auf die relativen Abstände von st_T des Szenarios 2 zum Basisszenario ist erkennbar, dass sich st_T auch von 2009 bis 2025 reduziert, jedoch in geringerem Maße. Zudem liegen die relativen Abstände zwischen -10 und -20 %. Im Durchschnitt ist ein prozentualer Abstand von 16,5 % zum Basisszenario zu verzeichnen. (siehe Abbildung 9.15b)

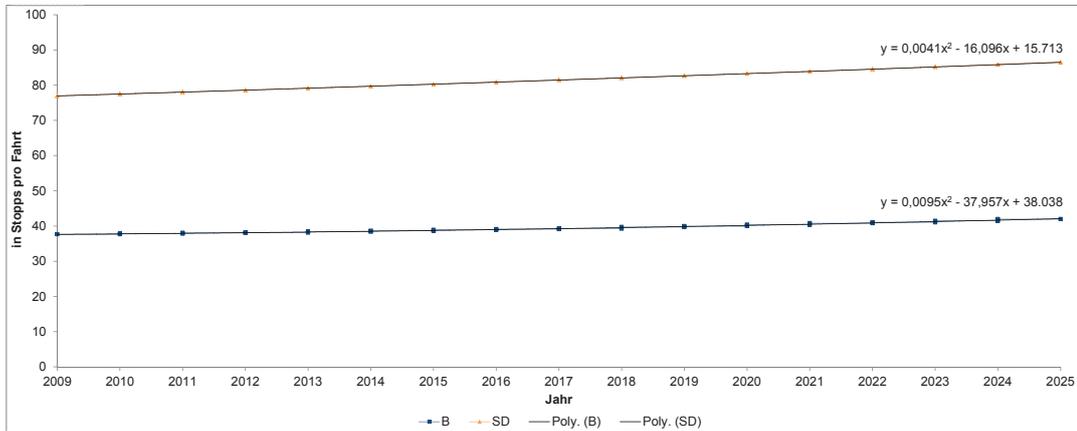
Die zeitliche Entwicklung der Transportzeit pro Tour t_T in der MEP als auch im Rückkopplungsansatz wird in Abbildung 9.16a gezeigt. Die Entwicklungskurve der MEP verläuft auf den ersten Blick linear ansteigend. Der Entwicklungsgraph der Rückkopplung unterliegt hingegen Schwankungen zwischen 5,2 und 5,4 h/F von 2009 bis 2025. Mittels der asymptotischen Analyse kann jedoch ein quadratisches Wachstum des MEP-Entwicklungsgraphen mit R^2 von 1 nachgewiesen werden. Dagegen handelt es sich bei der Entwicklungskurve des Rückkopplungsansatzes um eine polynomische Funktion 4. Grades, die leichten Schwankungen unterworfen ist. Der Zusammenhang zwischen der Trendlinie und den Simulationsergebnissen ist jedoch mit R^2 von 0,4972 relativ gering.

t_T wächst in der MEP-Simulation von 5,8 h/F im Jahr 2009 auf 6,2 h/F 2025 um insgesamt 6,8 %. Wie zuvor bereits erwähnt, ist das Wachstum von t_T im Rückkopplungsansatz sehr gering und mit 0,316 % muss hier bereits von einer Stagnation oder einem konstanten Verlauf gesprochen werden. In Abbildung 9.16b werden die relativen Abstände pro Jahr zwischen 2009 und 2025 der MEP und des Rückkopplungsansatzes aufgezeigt. Der prozentuale Abstand zwischen den beiden Entwicklungskurven nimmt dabei bis 2025 stetig zu. Dieser liegt im Mittel bei 10,8 %. t_T fällt in der Rückkopplung deutlich geringer als in der MEP-Simulation aus. Starken Einfluss auf diese Entwicklung haben dabei wiederum die Variablen Dropfaktor β und Stopps pro Tour st_T .

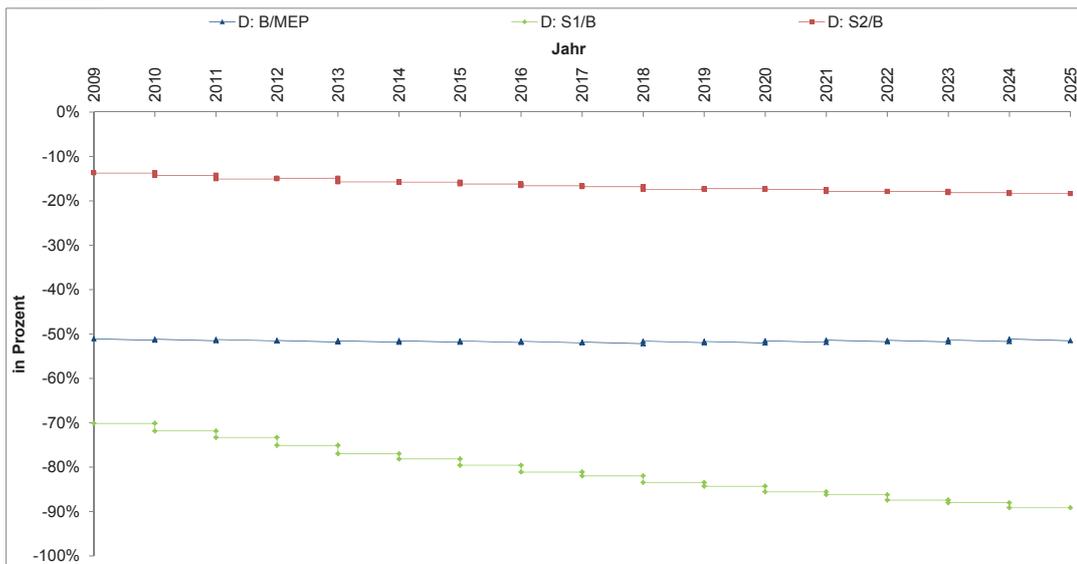
Die relativen Abstände der Simulationsergebnisse von t_T des Szenarios 1 zum Basisszenario liegen im Durchschnitt bei -32,7 %. Die Transportzeit pro Tour fällt nicht nur geringer aus, sondern reduziert sich zunehmend innerhalb des Betrachtungshorizonts von 2009 bis 2025. Im Vergleich dazu weichen die Simulationsergebnisse des Szenarios 2 um 5,6 % vom Basisszenario ab. Die Entwicklungskurve der prozentualen Abstände des Szenarios 2 ist im Vergleich zu Szenario 1 relativ stagnierend und schwankt innerhalb des Betrachtungshorizonts um -5 %. (siehe Abbildung 9.16b)

Die Simulationsergebnisse zur Gesamttransportzeit t_{GT} werden in Abbildung 9.17a dargestellt. Hierbei liegt die Entwicklungskurve der MEP über der des Rückkopplungsansatzes. In der MEP-Simulation wächst t_{GT} bis 2025 um 186,8 %, dagegen in der Rückkopplung um 169,2 %. Dies wird zudem durch die steilere Wachstumskurve der MEP im Gegensatz zur Rückkopplung verdeutlicht. Die asymptotische Auswertung ergibt, dass beide Entwicklungsgraphen quadratisches Wachstum vorweisen.

9. Auswertung der Simulationsergebnisse

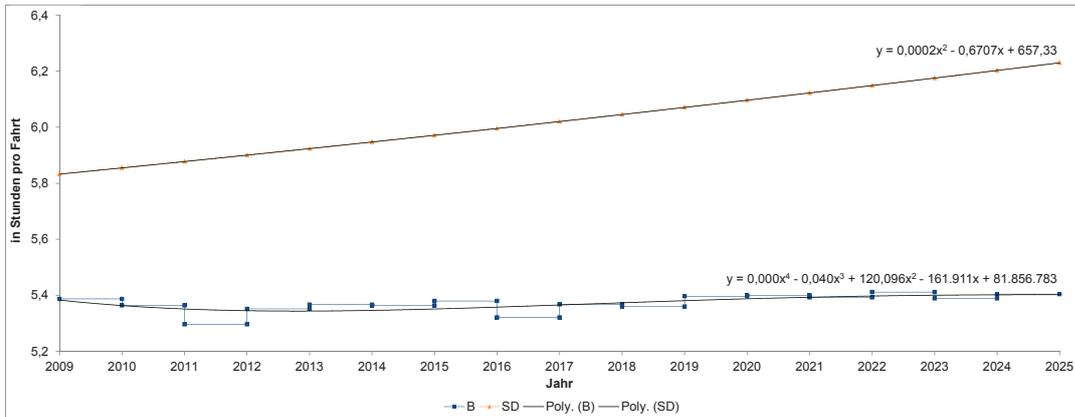


(a) Simulationsergebnisse zu Stops pro Tour.

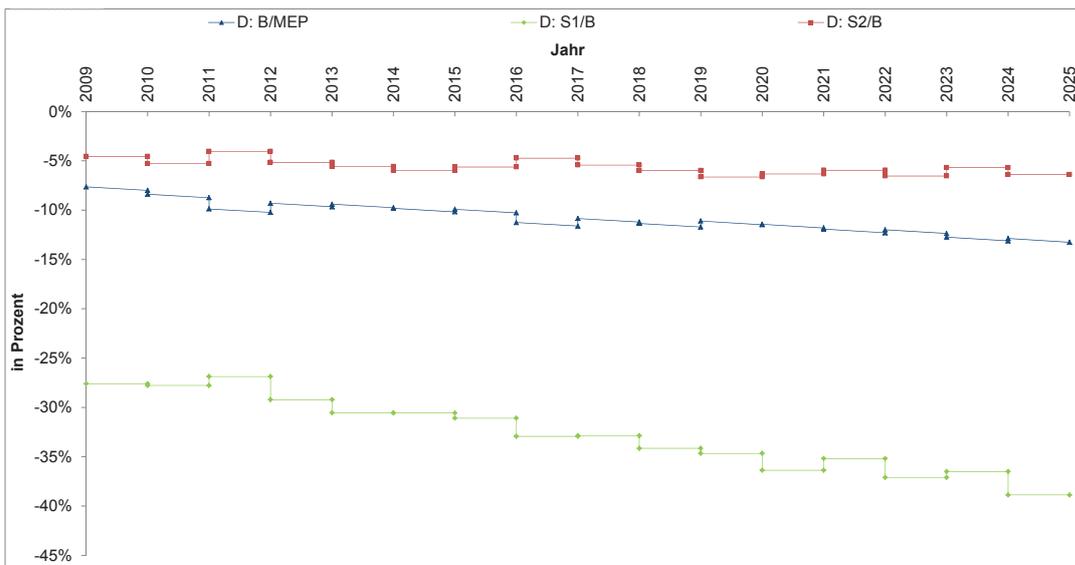


(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: Stops pro Tour.

Abbildung 9.15.: Stops pro Tour.



(a) Simulationsergebnisse zur Transportzeit pro Tour.

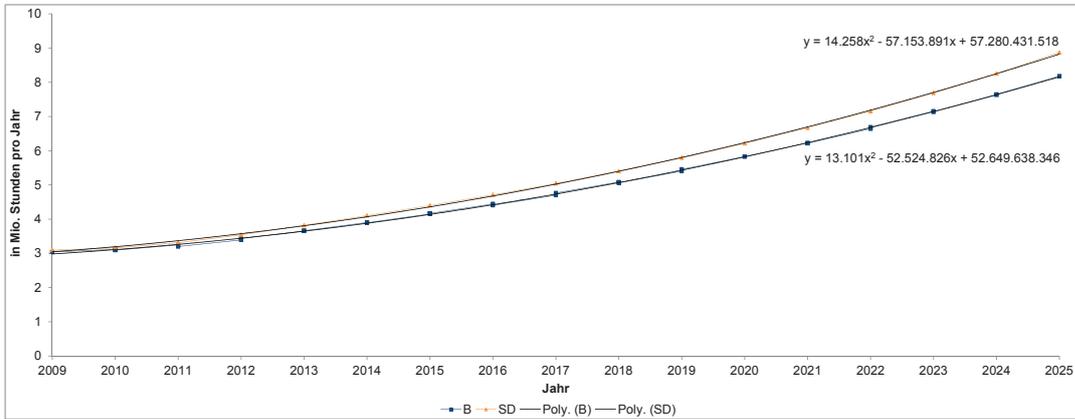


(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: Transportzeit pro Tour.

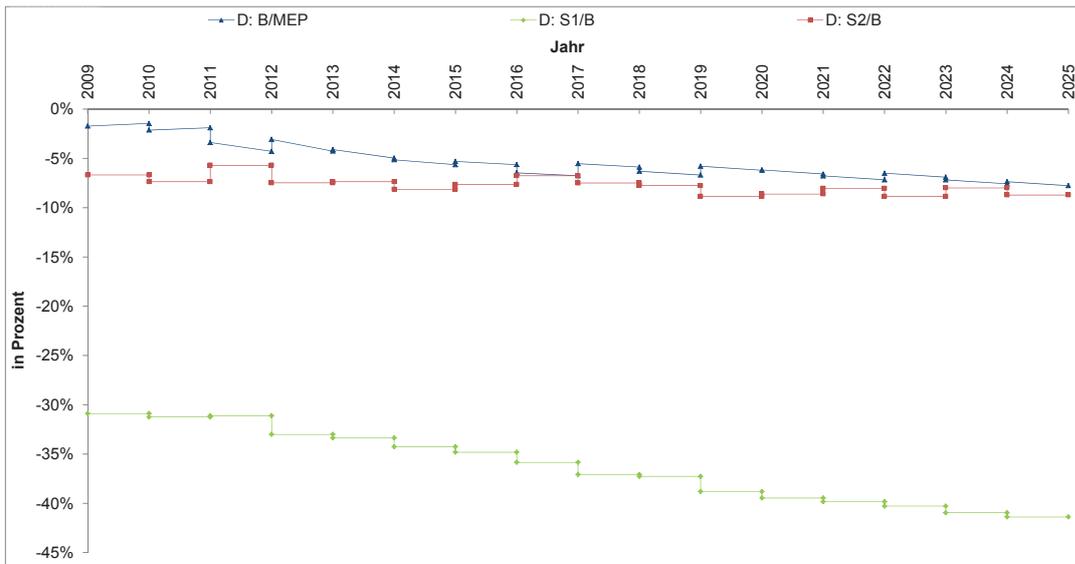
Abbildung 9.16.: Transportzeit pro Tour.

Dies wird jeweils mit R^2 von 0,9997 hinterlegt. Abbildung 9.17b zeigt den relativen Abstand zwischen den Simulationsergebnissen der MEP und der Rückkopplung. Die Werte des Entwicklungsgraphen der Rückkopplung sind jeweils geringer als die der MEP. Zunächst ist der relative Abstand zwischen den beiden Graphen noch sehr gering, dieser nimmt jedoch bis 2025 stetig ab. Dieser Abstand lässt sich durch den starken Einfluss der Güternachfrage gvn auf t_{GT} erklären. Der mittlere prozentuale Abstand zwischen den beiden Entwicklungsgraphen liegt hierbei bei 5,4 %.

Die Simulationsergebnisse zur Gesamttransportzeit t_{GT} des Szenarios 1 weichen im Mittel um 36,2 % von den Simulationswerten des Basisszenarios ab. Der Entwicklungsgraph des relativen Abstandes von t_{GT} stagniert von 2009 bis 2012 bei ca. -30 %, danach nimmt dieser stufenweise bis 2025 ab. In Szenario 2 fällt t_{GT} im Durchschnitt um 7,7 % geringer als im Basisszenario aus. Der Entwicklungsgraph des relativen Abstands von S2 schwankt dabei um -7 % und stagniert in diesem Zuge von 2009 bis 2025. (siehe Abbildung 9.17b)



(a) Simulationsergebnisse zur Gesamttransportzeit.



(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: Gesamttransportzeit.

Abbildung 9.17.: Gesamttransportzeit.

9.7. Transportkosten

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse des Submoduls Transportkosten präsentiert. Hierbei wird vornehmlich auf die fixen c_F , variablen Transportkosten c_L und zeitlich abhängigen Personalkosten c_{PK} eingegangen.

Zur Simulation des Rückkopplungsansatzes wurde die MEP zu diesem Zweck im Vergleich zum Submodul Transportkosten der MEP (siehe Kapitel 5.1.2) marginal verändert. Dabei wirkt nicht wie zuvor der intern berechnete Gesamtflottenbestand fb auf die Entwicklung der Transportkostenbestandteile, sondern der Initialwert des Gesamtflottenbestandes FB_I , der mittels der MVS erhoben wird. Dementsprechend werden die Formulierungen zu den folgenden Variablen angepasst.

- Leistungsabschreibung pro km c_{LA} (vgl. Formel (5.60))
- Zeitabschreibung c_{ZA} (vgl. Formel (5.66))
- Zinskosten c_{ZI} (vgl. Formel (5.68))
- Steuern und Versicherungen c_{SV} (vgl. Formel (5.69))
- Sonstige Kosten c_{SO} (vgl. Formel (5.72))
- Personalkosten c_{PK} (vgl. Formel (5.76))

$$c_{LA} = \frac{LP - r\bar{w} - \frac{RP}{F}}{l} \rho_{LA} FB_I \quad (9.4)$$

$$c_{ZA} = c_{ZL} FB_I \quad (9.5)$$

$$c_{ZI} = c_{ZC} FB_I \quad (9.6)$$

$$c_{SV} = SV FB_I \quad (9.7)$$

$$c_{SO} = SO FB_I \quad (9.8)$$

$$c_{PK} = PK \beta_{PF} FB_I \quad (9.9)$$

Die Simulationsergebnisse zu den Personalkosten c_{PK} werden in der Abbildung 9.18a dargestellt. c_{PK} steigt von 2009 bis 2025 um 293,9 % in der MEP, dagegen in der Rückkopplung um 292 % an. Beide Entwicklungsgraphen zeigen quadratisches Wachstumsverhalten. R^2 von 0,9995 für den MEP-Entwicklungsgraphen und R^2 von 0,9925 für die Rückkopplung bestätigen die jeweilige Übereinstimmung mit der Trendlinie und den Simulationsergebnissen.

c_{PK} wird im Rückkopplungsansatz vornehmlich vom Initialwert des Gesamtflottenbestandes FB_I beeinflusst, der durch die MVS pro Jahr vorgegeben wird. Daraus resultiert ein stufenförmiger Entwicklungsgraph von 2009 bis 2025. Zudem lässt sich erkennen, dass die Personalkosten in der Rückkopplung höher als in der MEP ausfallen. Dies liegt wiederum am Einfluss von FB_I , da in der MVS mehr Fahrzeuge zur Distribution als in der MEP benötigt werden. Der relative Abstand zwischen den beiden Entwicklungsgraphen wird in Abbildung 9.18b aufgezeigt. Hierbei wird verdeutlicht, dass die Personalkosten pro Jahr von der MVS mittels der Variablen FB_I angepasst werden. Dadurch ergeben sich die starken Schwankungen pro Jahr. Die mittlere prozentuale Abweichung beträgt 7,8 %.

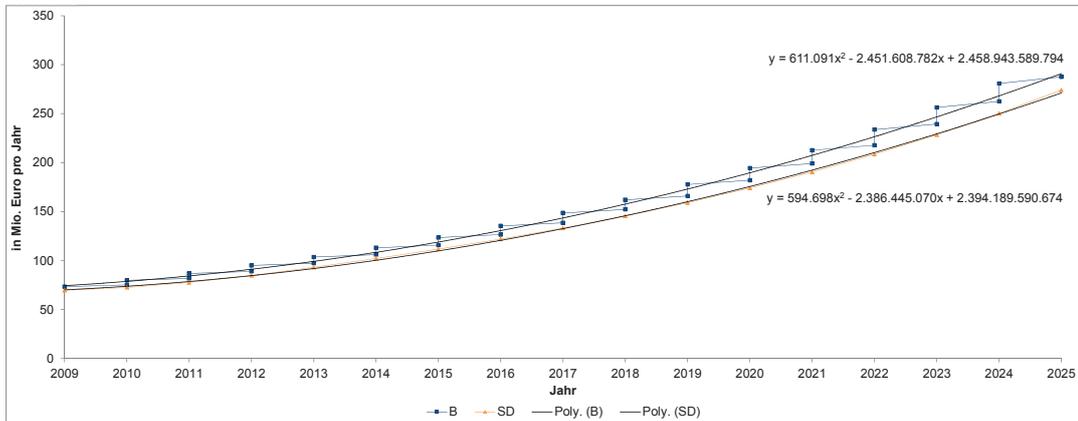
In Abbildung 9.18b werden die Simulationswerte von c_{PK} der Maßnahmen szenarien im relativen Vergleich zum Basisszenario gezeigt. Szenario 1 weicht vom Basisszenario im Durchschnitt um 5,3 % ab. Die Entwicklungskurve der relativen Abweichung von c_{PK} zeigt Schwankungen von 2009 bis 2025 um -5 %. Im Gegensatz dazu fallen die Schwankungen des Entwicklungsgraphen des Szenarios 2 schwächer als die von Szenario 1 aus. Dieser Graph entwickelt sich relativ stagnierend bis 2025. Die mittlere prozentuale Abweichung liegt dabei bei 2,2 %.

Die durchschnittliche Entwicklung der Variablen Personalkosten pro h pk_h wird vornehmlich in der MEP berechnet. Diese Variable wird nicht von der MVS beeinflusst. Daher wird im Folgenden nur die zeitliche Entwicklung von pk_h der MEP-Simulation beschrieben. Die Personalkosten pro Stunde pk_h sind von den Personalkosten pro Fahrer PK , der Anzahl der Einsatz Tage pro Jahr n_{GT} und den Arbeitsstunden pro Tag h_{AS} abhängig, wobei PK der maßgebliche Entwicklungstreiber von pk_h ist. Die Personalkosten pro Stunde steigen von 11,60 €/h im Jahr 2009 auf 17,02 €/h 2025 um insgesamt 46,7 %. Der Entwicklungsgraph zeigt quadratisches Wachstumsverhalten, das durch R^2 von 1 bestätigt wird.

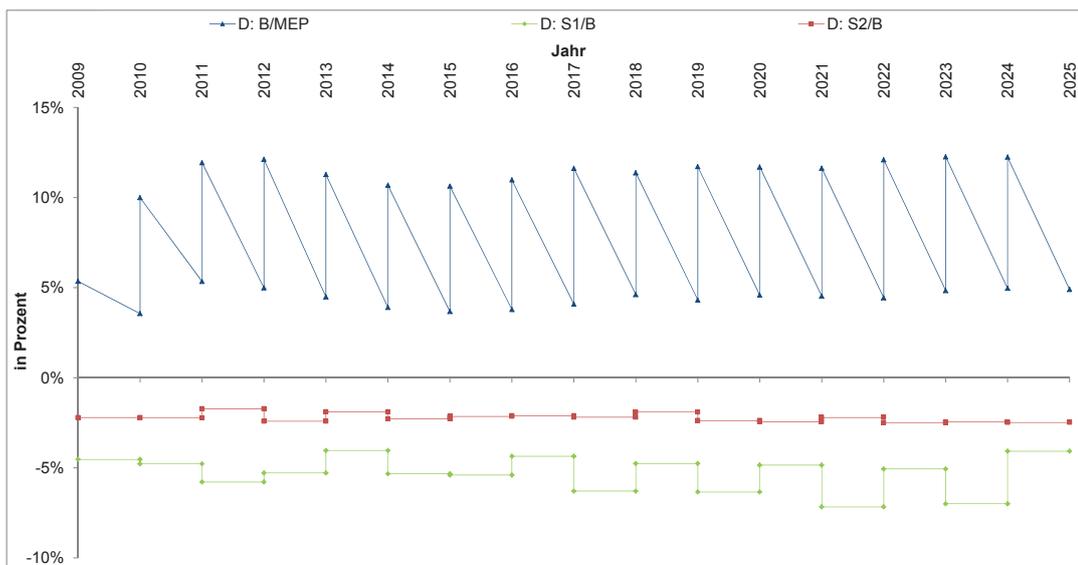
Die Entwicklung der variablen Transportkosten c_L wird in der Abbildung 9.20a gezeigt. Hierbei wird erkennbar, dass beide Entwicklungsgraphen der MEP und des Rückkopplungsansatzes quadratisches Wachstumsverhalten vorweisen. R^2 von 0,9992 für den MEP-Entwicklungsgraphen und R^2 von 0,9986 für den Rückkopplungsgraphen bestätigen die starke Übereinstimmung der jeweiligen Trendlinien mit den Simulationsergebnissen.

Die variablen Transportkosten c_L nehmen in der MEP-Simulation um 310,8 % bis 2025 zu. Im Vergleich dazu steigt c_L im Rückkopplungsansatz um 302 % an. In der Abbildung 9.20a wird ersichtlich, dass die Abstände zwischen der MEP-Entwicklungskurve und der des Rückkopplungsansatzes relativ nah aneinanderliegen. Die Entwicklungskurve des Rückkopplungsansatzes liegt dabei unter der der MEP. Der geringe Abstand wird zudem in Abbildung 9.20b verdeutlicht, in der der relative Abstand zwischen der MEP und des Rückkopplungsansatzes aufgezeigt wird. Wiederum liegt der stufenförmige Verlauf des Entwicklungsgraphen des Rückkopplungsansatzes am Einfluss von FB_I . Der mittlere prozentuale Abstand beträgt 2,6 %.

9. Auswertung der Simulationsergebnisse



(a) Simulationsergebnisse zu Personalkosten.



(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: Personalkosten.

Abbildung 9.18.: Personalkosten.

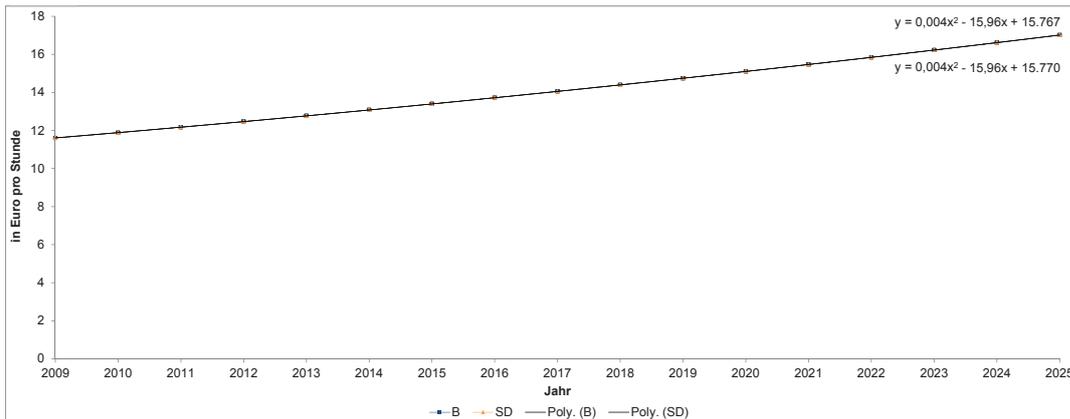


Abbildung 9.19.: Simulationsergebnisse zu Personalkosten pro Stunde.

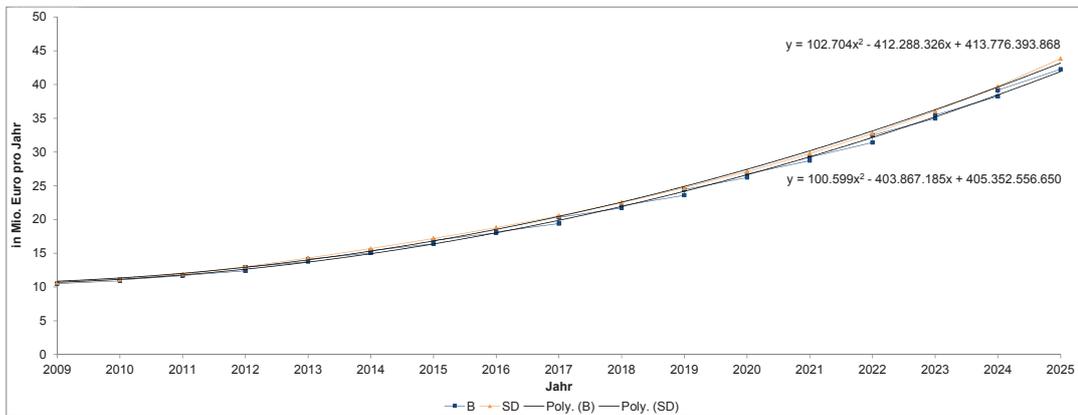
Die zeitliche Entwicklung der relativen Abstände der variablen Transportkosten c_L des Szenarios 1 zum Basisszenario zeigen, dass c_L bereits 2009 um 34 % geringer als im Basisszenario ausfällt. Innerhalb des Betrachtungshorizonts reduziert sich c_L auf annähernd -50 %. Der mittlere prozentuale Abstand beträgt 42,1 %. Die relativen Abstände der Simulationsergebnisse von Szenario 2 zum Basisszenario schwanken zwischen 2009 und 2025 um -9 %. Die Simulationsergebnisse der Szenarien 3 zur Distanzabhängigen Maut und 4 zur Cordon-Maut weichen nur in geringem Maße von denen des Basisszenarios ab. Die relativen Abstände zum Basisszenario schwanken zwischen 2009 und 2025 zwischen -1 % bis 1 %. Die mittlere, prozentuale Abweichung des Szenarios 3 beträgt 1,026 % und die des Szenarios 4 1,093 % im Vergleich zum Basisszenario. (siehe Abbildung 9.20b)

Die fixen Transportkosten c_F nehmen in der MEP um 208 %, im Rückkopplungsansatz um 206,5 % bis 2025 zu. Die Entwicklungskurven der MEP und des Rückkopplungsansatzes zeigen quadratisches Wachstumsverhalten. Dies wird mit R^2 von 0,9997 für die MEP und R^2 von 0,9897 für die Rückkopplung bestätigt.

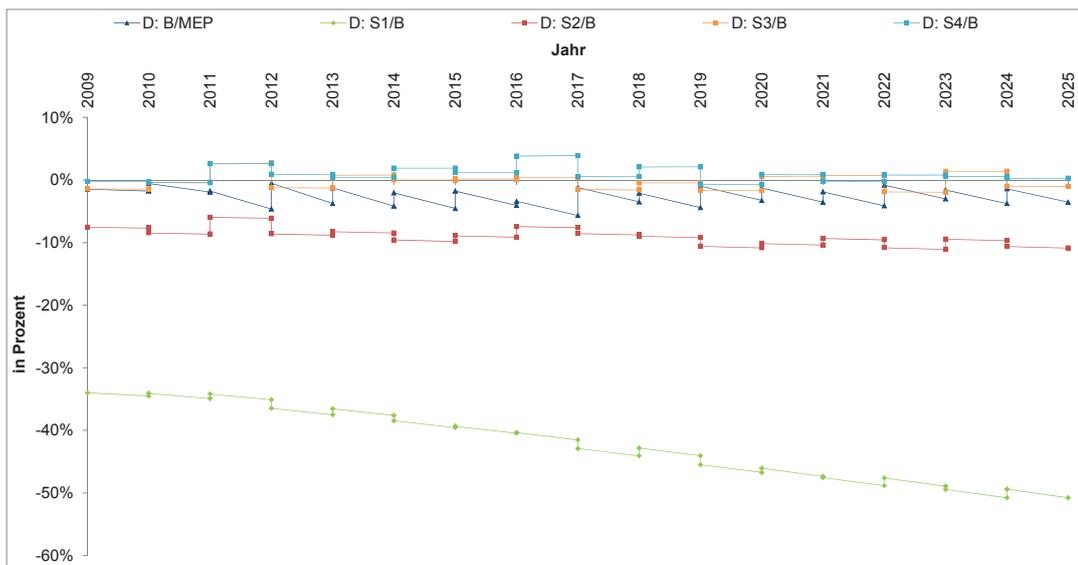
Die Entwicklungskurve von c_F der Rückkopplung liegt dabei über der der MEP. Der Entwicklungsgraph der Rückkopplung verläuft darüber hinaus stufenförmig. Dies liegt wiederum am Einfluss der jährlichen Anpassung von FB_I . Die Abbildung 9.21b verdeutlicht den relativen Abstand der beiden Graphen im Zeitraum von 2009 bis 2025 und insbesondere die ausgeprägten Schwankungen pro Jahr, die durch FB_I resultieren. Der mittlere prozentuale Abstand der Simulationsergebnisse der Rückkopplung zur MEP liegt bei 7,7 %.

Die relativen Abstände von c_F der Maßnahmenszenarien zum Basisszenario werden in der Abbildung 9.21b dargestellt. Die Simulationsergebnisse der fixen Transportkosten c_F im Szenario 1 fallen dabei im Durchschnitt um 5,3 % niedriger als im Basisszenario aus. Die Entwicklungskurve der relativen Abstände schwankt dabei zwischen -4 und -7 %. Im Vergleich dazu liegt die mittlere prozentuale Abweichung in Szenario 2 bei 2,3 %.

9. Auswertung der Simulationsergebnisse

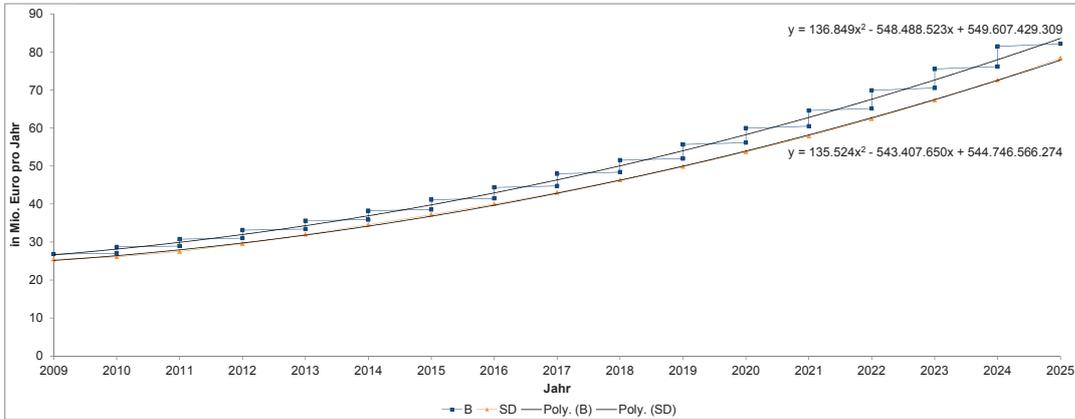


(a) Simulationsergebnisse zu variable Transportkosten.

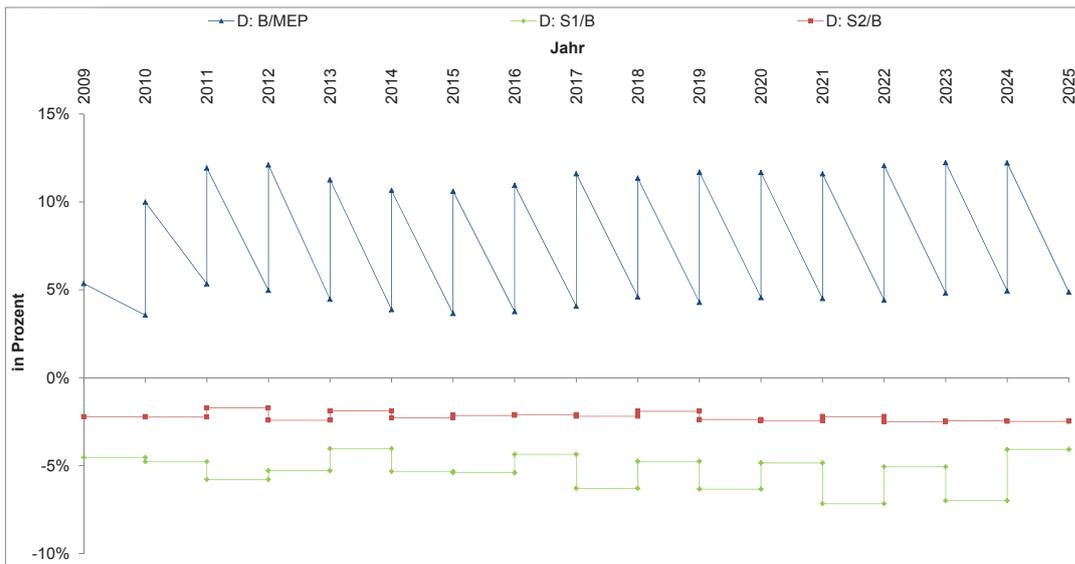


(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: variable Transportkosten.

Abbildung 9.20.: Variable Transportkosten.



(a) Simulationsergebnisse zu fixe Transportkosten.



(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: fixe Transportkosten.

Abbildung 9.21.: Fixe Transportkosten.

Die prozentualen Abstände zum Basisszenario bleiben dabei von 2009 bis 2025 relativ konstant, wobei die Entwicklungskurve nur eine geringe Schwankung aufweist.

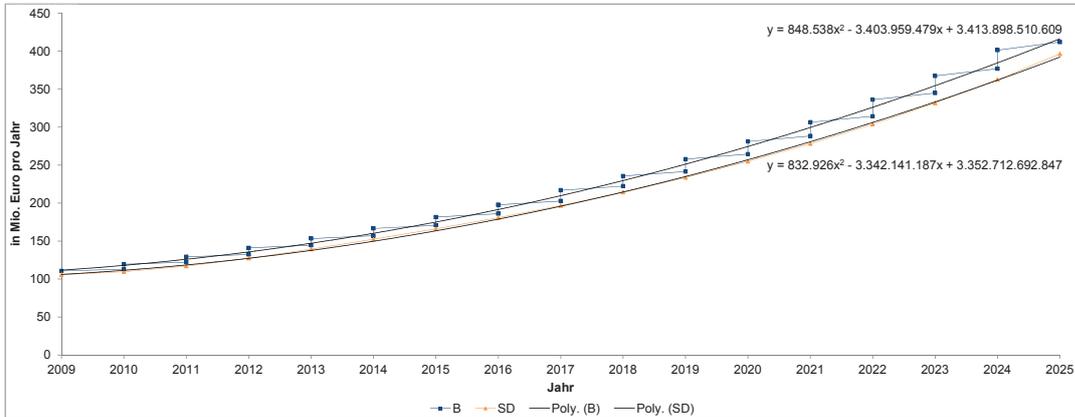
In Abbildung 9.22a werden die Simulationsergebnisse der Gesamttransportkosten c_T dargestellt. Die Entwicklungskurven der MEP und der Rückkopplung zeigen jeweils quadratisches Wachstumsverhalten. R^2 von 0,9995 für die MEP und R^2 von 0,993 für die Rückkopplung bestätigen den starken Zusammenhang zwischen den jeweiligen Simulationsergebnissen und den Trendlinien.

Die Simulationsergebnisse der Rückkopplung fallen im Betrachtungshorizont bis 2025 durchgängig höher als die der MEP aus. c_T wächst in der MEP um 274,9 % bis 2025, in der Rückkopplung hingegen um 272,4 %. Der stufenförmige Verlauf der Entwicklungskurve und die höheren Werte der Rückkopplung im Vergleich zum MEP-Entwicklungsgraphen verdeutlichen den starken Einfluss des Initialwertes des Gesamtflottenbestands FB_I auf das Submodul Transportkosten. In der Abbildung 9.22b wird der relative Abstand pro Jahr zwischen den MEP-Simulationsergebnissen zu denen des Rückkopplungsansatzes im Detail aufgezeigt. Die mittlere prozentuale Abweichung beträgt dabei 6,7 %.

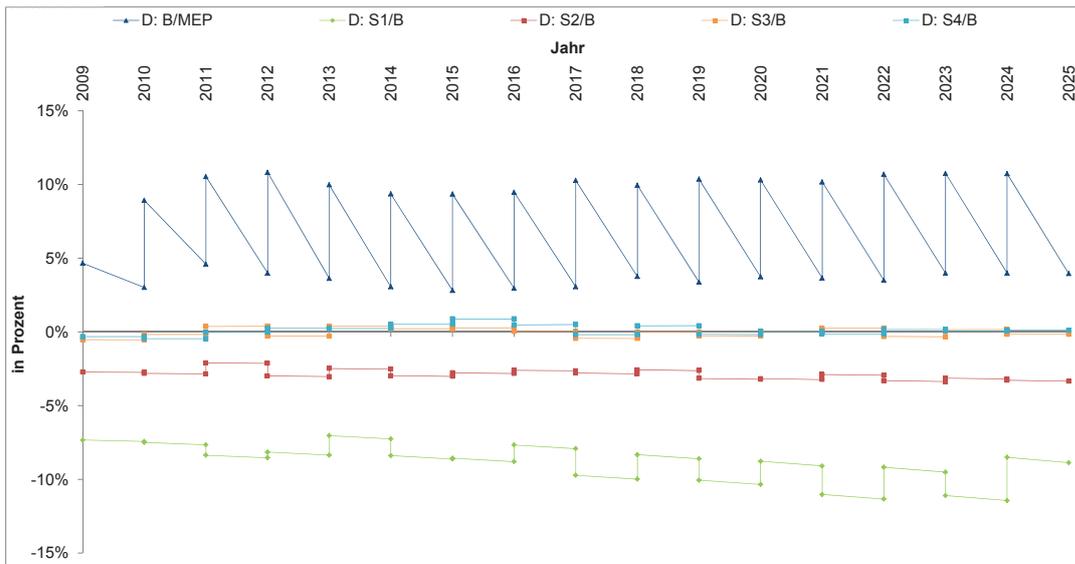
Die Abbildung 9.22b zeigt die relativen Abstände von c_T der Maßnahmenszenarien zum Basisszenario für den Betrachtungshorizont von 2009 bis 2025. Die Simulationsergebnisse des Szenarios 1 sind zwischen 7 und 10 % niedriger als im Basisszenario. Die Entwicklungskurve der relativen Abstände von c_T nimmt dabei von 2009 bis 2025 ab und zeigt ab 2016 stärkere Schwankungen im Entwicklungsverlauf. Der mittlere prozentuale Abstand beträgt dabei 8,9 %. Hingegen schwanken die relativen Abstände der Simulationsergebnisse des Szenarios 2 um -3 %. In diesem Fall sind die Schwankungen innerhalb des Betrachtungshorizonts relativ schwach. Die relativen Abstände zum Basisszenario bleiben dabei zwischen 2009 und 2025 annähernd konstant. Die Einflüsse der Distanzabhängigen Maut in Szenario 3 und der Cordon-Maut in Szenario 4 liegen unter 1 % und sind aus diesem Grund vernachlässigbar (für Distanzabhängige Maut: 0,246 % Abweichung; für Cordon-Maut: 0,28 % Abweichung).

Im Folgenden wird der Entwicklungsverlauf der Variablen *variable Kosten pro km* $c_{L,km}$ genauer analysiert. Die beiden Entwicklungskurven der MEP und der Rückkopplung scheinen auf den ersten Blick relativ linear zu wachsen. Bei genauerer Betrachtung wird jeweils ein quadratisches Wachstum festgestellt, das mit R^2 von 0,9998 für die MEP und R^2 von 0,9892 für die Rückkopplung bestätigt wird. (siehe Abbildung 9.23a)

$c_{L,km}$ wächst in der MEP von 0,31733 €/km 2009 auf 0,4855 €/km 2025 um 53 %. Im Gegensatz dazu wird im Rückkopplungsansatz ein Anstieg von 51,96 % bis 2025 berechnet (2009: 0,32952 €/km; 2025: 0,50075 €/km). Die Simulationsergebnisse von $c_{L,km}$ der Rückkopplung sind durchgängig höher als die der MEP. Zudem wird ein stufenförmiger Verlauf der Entwicklungskurve der Rückkopplung erkennbar, der wiederum durch den Einfluss von FB_I auf das Submodul resultiert. (siehe Abbildung 9.23a) Der prozentuale Abstand zwischen den Simulationsergebnissen der MEP und der Rückkopplung wird in der Abbildung 9.23b gezeigt. Die mittlere prozentuale Abweichung liegt bei 4,97 %.



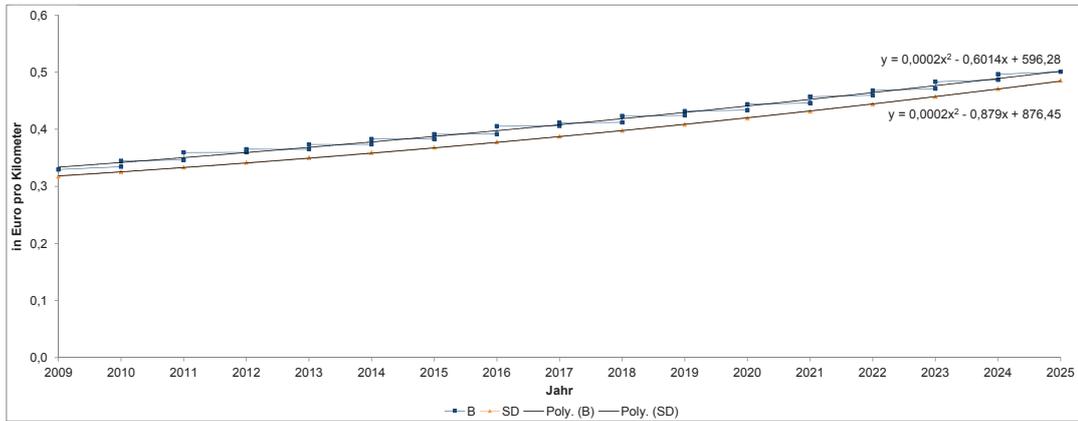
(a) Simulationsergebnisse zu Gesamttransportkosten.



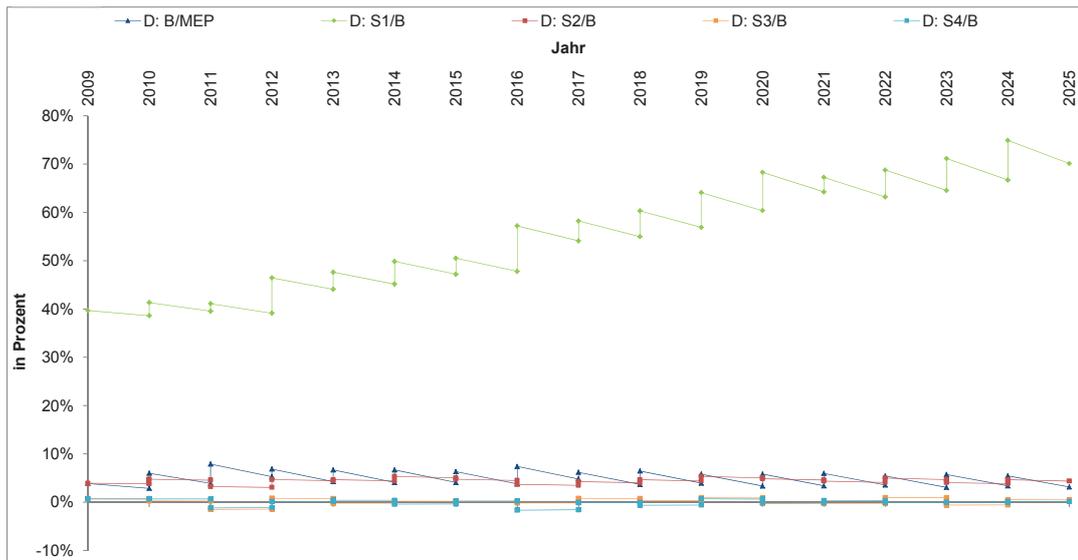
(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: Gesamttransportkosten.

Abbildung 9.22.: Gesamttransportkosten.

9. Auswertung der Simulationsergebnisse



(a) Simulationsergebnisse zu variable Transportkosten pro km.



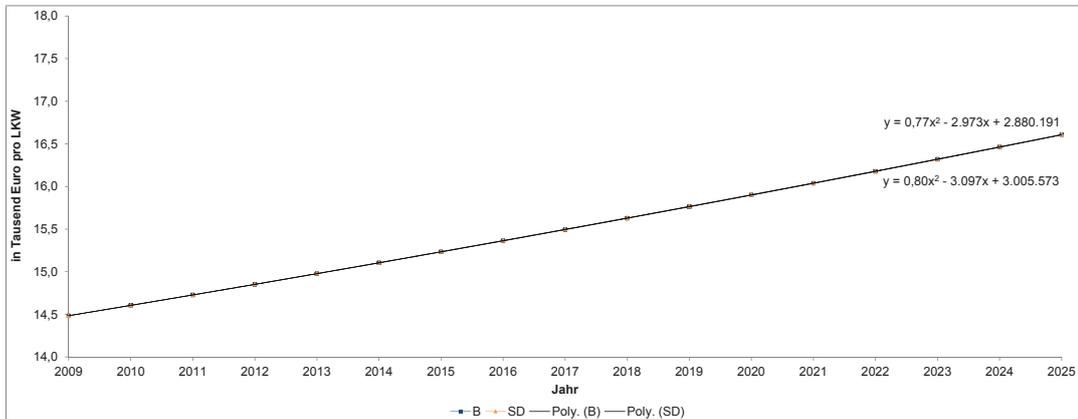
(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: variable Transportkosten pro km.

Abbildung 9.23.: Variable Transportkosten pro km.

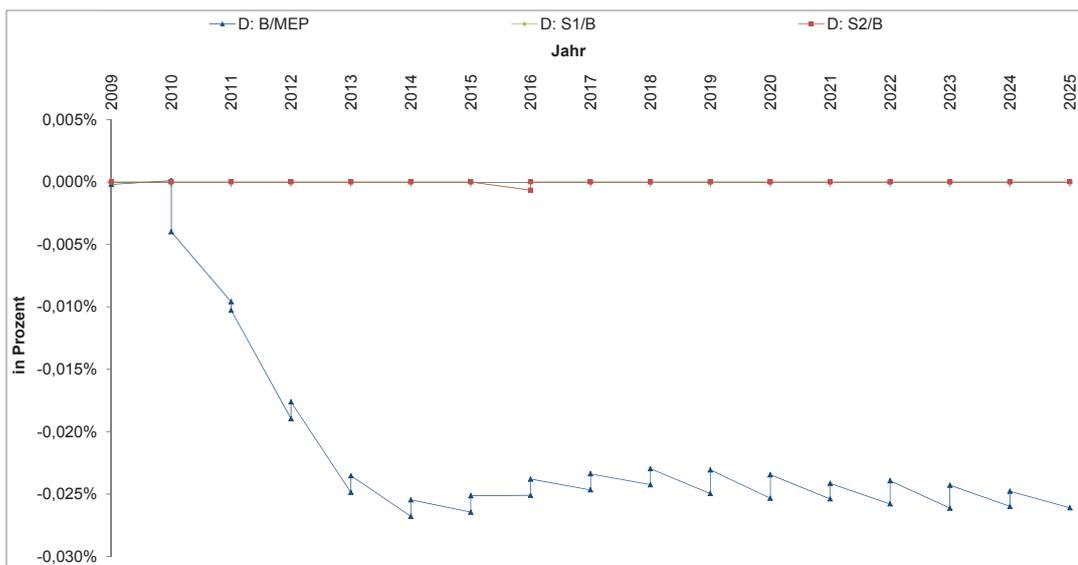
Die relativen Abstände der Simulationswerte von $c_{L,km}$ des Szenarios 1 zum Basiszenario liegen zwischen 40 bis über 70 %. Dabei nehmen die Abstände von 2009 bis 2025 stetig zu. Die mittlere prozentuale Abweichung beträgt 55,1 %. Hingegen schwanken die relativen Abweichungen des Szenarios 2 zum Basiszenario zwischen 4 und 5 %. Im Durchschnitt ist eine prozentuale Abweichung von 4,4 % zu verzeichnen. Die Abweichungen der Szenarien 3 und 4 sind mit 0,524 % (S3) und 0,455 % (S4) sehr gering. (siehe Abbildung 9.23b)

In Abbildung 9.24a wird der Entwicklungsverlauf der Fixkosten pro LKW $c_{F,LKW}$ aufgezeigt. Die beiden Entwicklungsgraphen der MEP und der Rückkopplung zeigen ein quadratisches Wachstumsverhalten von 2009 bis 2025, das jeweils mit R^2 von 1 hinterlegt wird. Die Abbildung lässt zudem keinen Unterschied zwischen der Entwicklungskurve der MEP und der Rückkopplung erkennen. Dies lässt sich einerseits damit bestätigen, dass $c_{F,LKW}$ bis 2025 in der MEP um 14,68 % und im Vergleich dazu in der Rückkopplung um 14,65 % anwächst. Andererseits wird in der Abbildung 9.24b ersichtlich, dass die Simulationsergebnisse des Rückkopplungsansatzes von denen der MEP zwar abweichen, jedoch in sehr geringem Maße. Der mittlere relative Abstand liegt bei 0,021 % und kann in diesem Fall vernachlässigt werden.

9. Auswertung der Simulationsergebnisse



(a) Simulationsergebnisse zu fixe Transportkosten pro LKW.



(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: fixe Transportkosten pro LKW.

Abbildung 9.24.: Fixe Transportkosten pro LKW.

9.8. Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse zu den ökologischen Effekten des Güterverkehrs aufgezeigt. Vornehmlich wird die zeitliche Entwicklung der Emissionen Kohlenstoffdioxid CO_2 , Kohlenstoffmonoxid (CO), Feinstaubpartikel (PM_{10}), Kohlenwasserstoffe (HC) und Stickoxide (NO_x) genauer analysiert.

Zunächst liegt der Fokus auf der Analyse der CO_2 Emissionen e_1 , die maßgeblich vom Kraftstoff- kv und Adblueverbrauch av abhängig sind. In Abbildung 9.25a zeigen die Entwicklungsgraphen der MEP und der Rückkopplung jeweils ein quadratisches Wachstumsverhalten. R^2 von 0,9995 für die MEP und R^2 von 0,9987 für die Rückkopplung bestätigen den starken Zusammenhang zwischen den jeweiligen Simulationsergebnissen und den Trendlinien.

Die Simulationsergebnisse der MEP sind dabei höher als die der Rückkopplung, was am Einfluss des Kraftstoff- kv und Adblueverbrauchs av liegt. Bis 2025 wächst e_1 um 145 % in der MEP und um 142 % in der Rückkopplung an. Die relativen Abstände der Simulationsergebnisse der Rückkopplung zur MEP pro Jahr werden in der Abbildung 9.25b dargestellt. Die Ergebnisse der Rückkopplung fallen niedriger aus und schwanken von 2009 bis 2025 geringfügig. Die mittlere prozentuale Abweichung beträgt 7,6 %.

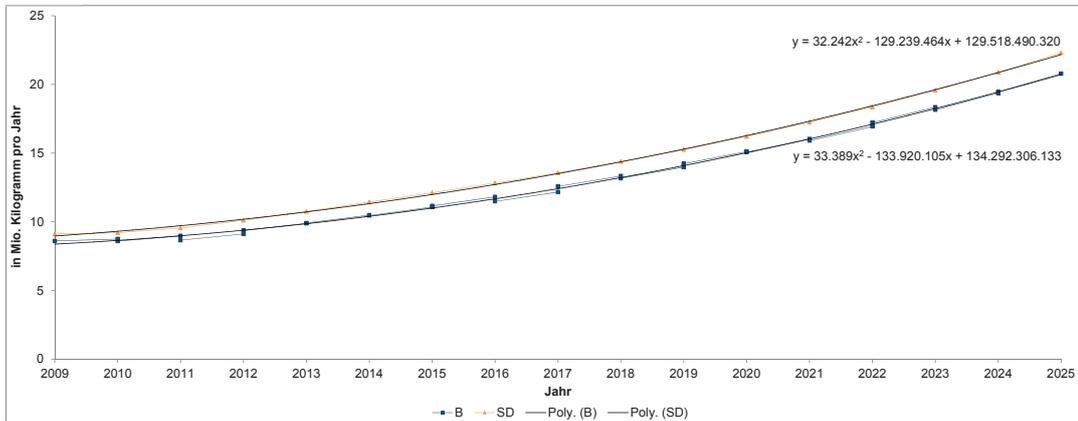
Die weiteren Emissionen e_i (u. a. Kohlenstoffmonoxide [CO], Feinstaubpartikel [PM_{10}], Kohlenwasserstoffe [HC], Stickoxide [NO_x]) werden durch die *Laufleistung auf der Letzten Meile* l_{LM} beeinflusst (siehe Formel (5.85)). Zudem sind die Konversionsfaktoren β_i im MEP-Modell als Variablen definiert und verändern sich über die Zeit durch den Einfluss der Anteile der Fahrzeuge je Emissionsklasse j α_j und den Konversionsfaktoren je Emissionstyp i und Emissionsklasse j $\beta_{i,j}$ (siehe Formel (5.84)).

HC+ NO_x e_2 nimmt von 2009 bis 2025 um 38,7 % in der MEP-Simulation ab. In der Rückkopplung schrumpft e_2 sogar um 39,7 %. In Abbildung 9.26a werden die beiden Entwicklungskurven der MEP und der Rückkopplung aufgezeigt, die beide ein polynomisches Entwicklungsverhalten 5. Grades zeigen. Dies bedeutet, dass die zeitliche Entwicklung von e_2 jeweils Schwankungen unterworfen ist. Dies kann am Einfluss des sich verändernden Konversionsfaktors β_2 liegen. Eine hohe Übereinstimmung der Trendlinien mit den Simulationsergebnissen wird jeweils durch einen hohen Wert von R^2 (für MEP: 0,998; für Rückkopplung: 0,9937) bestätigt.

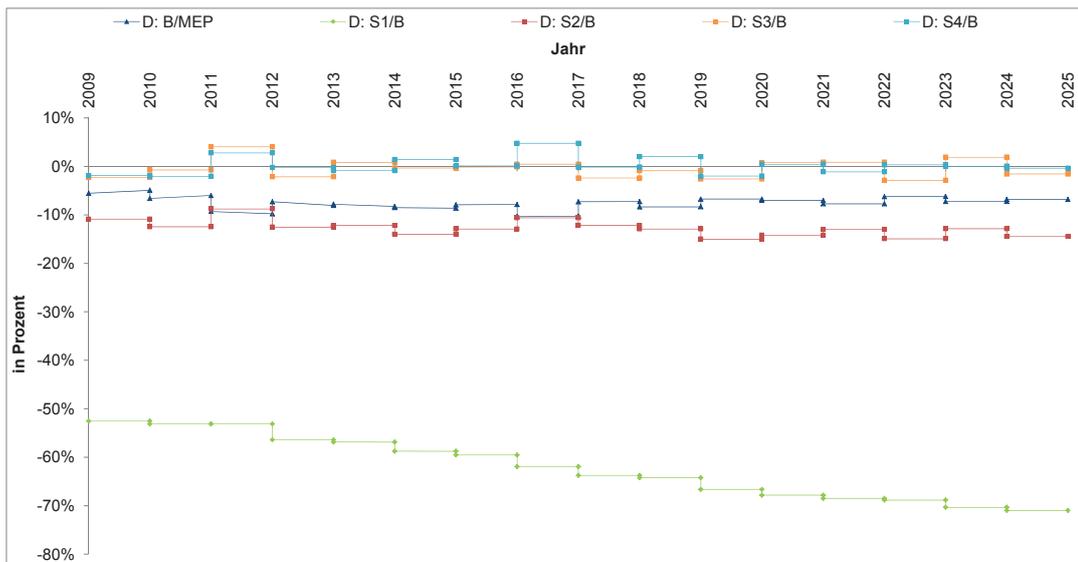
Die Abbildung 9.26a zeigt zudem, dass die Simulationsergebnisse von e_2 in der MEP höher als in der Rückkopplung prognostiziert werden. Dies liegt am Einfluss von l_{LM} . Die prozentuale Abweichung der Simulationsergebnisse der MEP und der Rückkopplung werden in der Abbildung 9.26b dargestellt. Die mittlere prozentuale Abweichung liegt bei 7,3 %.

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse zu Kohlenstoffmonoxid CO e_3 genauer analysiert. Nach der asymptotischen Analyse entsprechen die Entwicklungskurven der MEP und der Rückkopplung polynomischen Funktionen 4. Grades. Dies wird jeweils mit R^2 von 0,9997 für die MEP und R^2 von 0,9992 für die Rückkopplung bestätigt. Beide Entwicklungskurven von e_3 nehmen im Zeitraum von 2009 bis 2025 um ca. 82 bis 83 % stetig ab.

9. Auswertung der Simulationsergebnisse



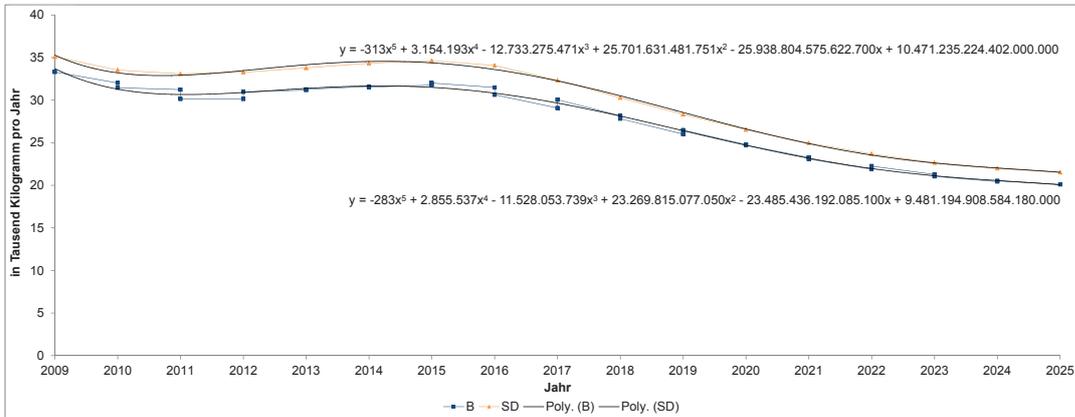
(a) Simulationsergebnisse zu CO₂ Emissionen.



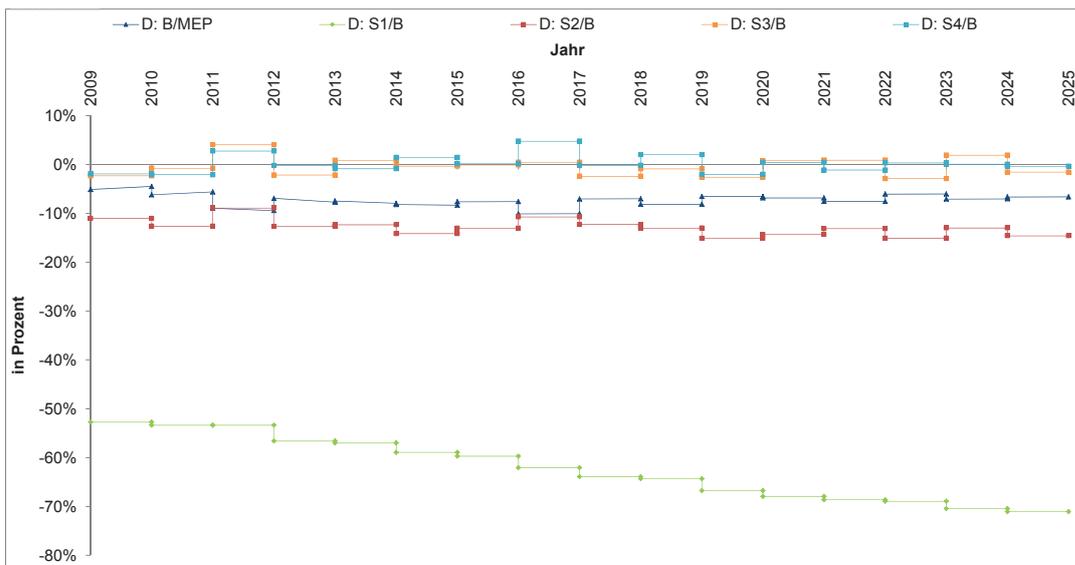
(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: CO₂ Emissionen.

Abbildung 9.25.: CO₂ Emissionen.

9.8. Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage



(a) Simulationsergebnisse zu HC+NO_x Emissionen.



(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: HC+NO_x Emissionen.

Abbildung 9.26.: HC+NO_x Emissionen.

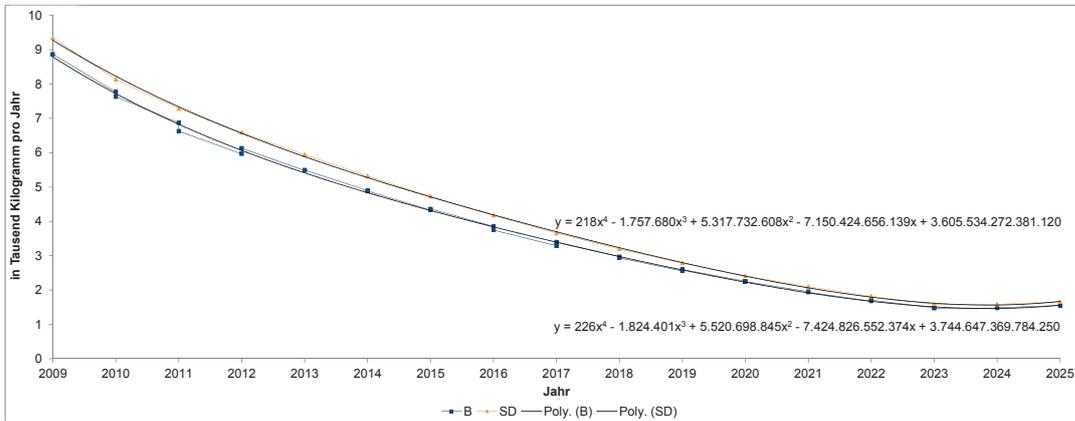
Die Simulationsergebnisse der MEP fallen für e_3 höher als die der Rückkopplung aus, was wiederum am Einfluss der Laufleistungsentwicklung l_{LM} liegt. Die Abbildung 9.27b zeigt jedoch, dass der relative Abstand zwischen den Simulationsergebnissen der Rückkopplung und der MEP zwischen 2009 und 2025 mehreren Schwankungen unterworfen ist. Die mittlere prozentuale Abweichung beträgt 7,35 %.

Die Simulationsergebnisse der MEP und der Rückkopplung zeigen, dass PM_{10} e_4 innerhalb des Zeitraums von 2009 bis 2025 um über 74 % abnimmt. Beide Entwicklungskurven weisen ein polynomisches Entwicklungsverhalten 3. Grades auf. Dies bedeutet, dass die Kurven eine Spitze und ein Tal vorweisen. Die Kurven öffnen sich zunächst bis 2016 nach unten, danach tritt eine Schwankung ein, die die Kurven nach oben öffnet. Das Tal wird im Jahr 2025 erreicht. Die polynomischen Funktionen der Kurven werden mit R^2 von 0,998 für die MEP und mit R^2 von 0,9976 für die Rückkopplung bestätigt. (siehe Abbildung 9.28a)

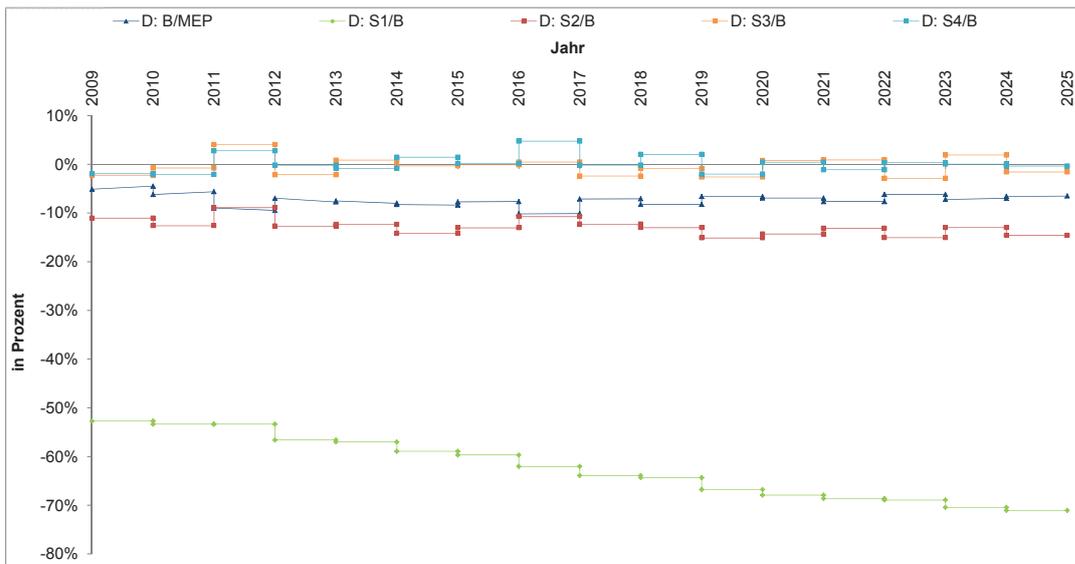
Auch im Fall von e_4 liegt die Entwicklungskurve der MEP über der der Rückkopplung. Die relativen Abweichungen der Simulationsergebnisse der Rückkopplung zur MEP weisen von 2009 bis 2025 Schwankungen auf (siehe Abbildung 9.28b). Der mittlere prozentuale Abstand beträgt 7,34 %.

Sowohl e_2 , als auch e_3 und e_4 zeigen polynomisches Entwicklungsverhalten. Dies liegt daran, dass die Entwicklung dieser Emissionen stark von den Konversionsfaktoren je Emissionstyp i β_i abhängig ist. Diese sind nicht, im Gegensatz zum CO_2 Konversionsfaktor, als konstante Werte definiert, sondern verändern sich im zeitlichen Betrachtungshorizont durch den Einfluss der Anteile der Fahrzeuge je Emissionsklasse j α_j . Dies bedeutet, dass sie von der Zusammensetzung der Fahrzeugflotte nach Emissionsklassen abhängig sind. Zudem wird der Einfluss der Laufleistung auf der Letzten Meile l_{LM} deutlich.

Im Rahmen der Analyse der relativen Abstände der Simulationsergebnisse der Maßnahmenzenarien zum Basisszenario hat sich gezeigt, dass sowohl für CO_2 Emissionen e_1 , als auch für $HC+NO_x$ e_2 , CO e_3 und PM_{10} e_4 annähernd dieselben prozentualen Abweichungen je betrachteter Maßnahme verzeichnet werden. Dies wird durch den Vergleich der Abbildungen 9.25b, 9.26b, 9.27b und 9.28b erkennbar. Dies ist auf den starken Einfluss der Laufleistung auf der Letzten Meile l_{LM} auf die Entwicklung der Emissionen zurückzuführen. In diesem Kontext betragen die mittleren prozentualen Abstände für e_1 , e_2 , e_3 und e_4 des Szenarios 1 zum Basisszenario 62,2 %. Die Entwicklungskurven der relativen Abstände zum Basisszenario fallen dabei um 50 bis 70 % niedriger aus. Die Simulationsergebnisse nehmen zudem von 2009 bis 2025 stetig ab. Die prozentualen Abweichungen des Szenarios 2 zum Basisszenario schwanken zwischen -9 und -15 % innerhalb des Betrachtungshorizonts. Im Durchschnitt beträgt die relative Abweichung 12,9 %. Die mittleren relativen Abweichungen der Szenarien 3 und 4 fallen sehr gering aus (für Distanzabhängige Maut (S3): 1,559 %; für Cordon-Maut: 1,293 %).



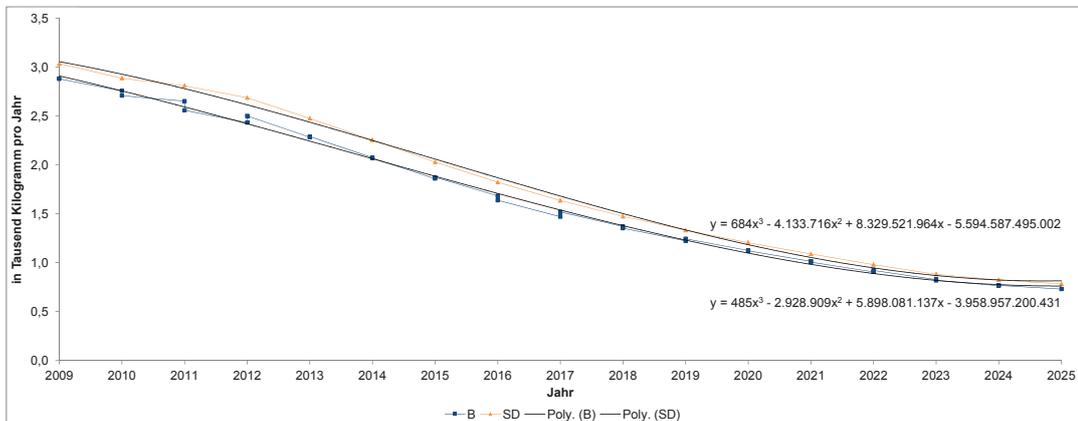
(a) Simulationsergebnisse zu CO Emissionen.



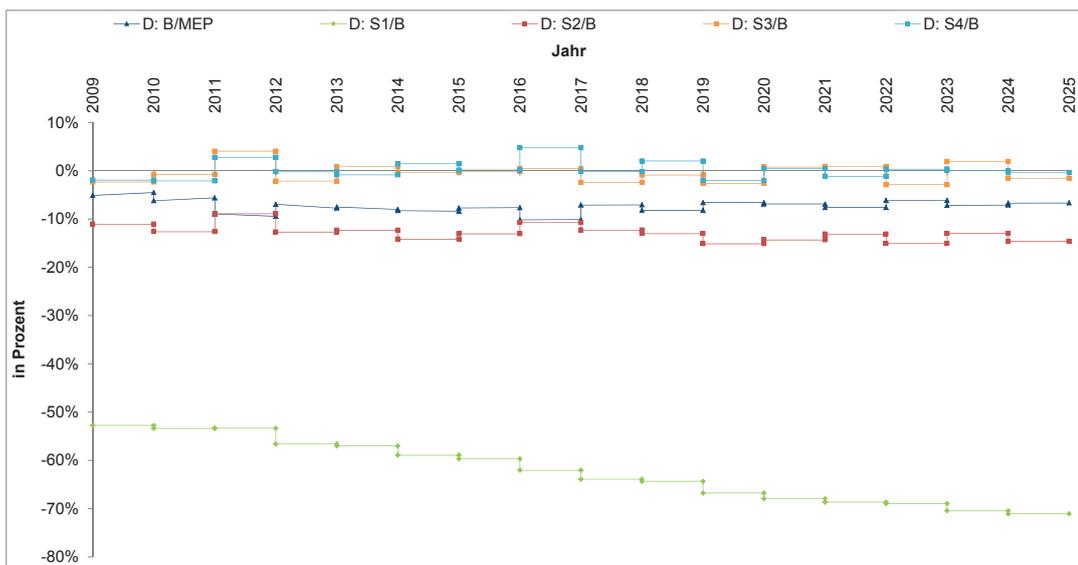
(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: CO Emissionen.

Abbildung 9.27.: CO Emissionen.

9. Auswertung der Simulationsergebnisse



(a) Simulationsergebnisse zu PM₁₀ Emissionen.



(b) Relative Unterschiede zwischen den Szenarien: PM₁₀ Emissionen.

Abbildung 9.28.: PM₁₀ Emissionen.

9.9. Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Final werden die Simulationsergebnisse in Kürze zusammengefasst und gegenübergestellt, um die wesentlichen Erkenntnisse aus der Auswertung abzuleiten. Hinsichtlich des Systemverhaltens hat sich mittels der asymptotischen Analyse gezeigt, dass das betrachtete System vornehmlich quadratisches Wachstumsverhalten aufweist. Dies deutet darauf hin, dass das System stark über die Zeit wächst. Ein Erreichen des Scheitelpunktes, an dem die Dämpfung einsetzt, ist innerhalb des Betrachtungszeitraums nicht abzusehen.

Exponentielles Wachstum wird nur bei den Variablen Private Güternachfrage pro Kunde GNK_p und Private Güternachfrage gn_p nachgewiesen. Hierbei ist gn_p direkt von GNK_p abhängig. Ferner tritt polynomisches Systemverhalten höheren Grades bei den Variablen Sendungen pro Tour s_T (Polynom 3. Grades), Transportdistanz pro Tour d_T (Polynom 6. Grades), Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} (Polynom 6. Grades) und Transportzeit pro Tour t_T (Polynom 4. Grades) auf. Wobei die Werte von s_T , d_T und \bar{v} pro Zeitschritt aus der MVS gewonnen werden und die MEP anpassen. Dabei handelt es sich maßgeblich um aggregierte Messgrößen aus der MVS, die Schwankungen im Zeitverlauf unterworfen sind. t_T wird dabei von diesen drei Messgrößen maßgeblich beeinflusst.

Auch die Variablen HC+NO_x e_2 (Polynom 5. Grades), CO e_3 (Polynom 4. Grades) und PM₁₀ (Polynom 3. Grades) zeigen polynomisches Verhalten höheren Grades. Dies liegt jeweils am Einfluss der zeitlichen Veränderung der Konversionsfaktoren je Emissionstyp i β_i und damit indirekt an der sich verändernden Flottenzusammensetzung nach Emissionsklassen j α_j , die auf β_i wirkt.

Das jeweilige Wachstumsverhalten der betrachteten Variablen innerhalb des zeitlichen Betrachtungshorizonts konnte mittels der identifizierten Funktionen nachgewiesen werden. Zudem wurden die Übereinstimmungen der Wachstumsfunktionen mit den Simulationsergebnissen mit jeweils einem sehr hohen R^2 -Wert von annähernd 1 bestätigt. (siehe Tabelle 9.2)

Hinsichtlich der mittleren prozentualen Abweichung der Simulationsergebnisse der Rückkopplung zur MEP ist festzustellen, dass die Werte des Dropfaktors β mit 96,3 % und der Stopps pro Tour st_T mit 51,6 % besonders stark von den Simulationswerten der MEP abweichen. Wobei in diesem Fall st_T direkt von β abhängig ist. Die Abweichung des Dropfaktors lässt sich damit erklären, dass gerade β_o in der MEP mit einem sehr geringen Wert von 2,5 Sendungen pro Stopp parametrisiert wurde. Hingegen wird in der MVS davon ausgegangen, dass sich die gewerbliche Güternachfrage gn_o auf die vorhandenen gewerblichen Kunden in der synthetischen Welt gleichmäßig verteilt. In der MVS-Welt verändert sich dabei die Anzahl der gewerblichen Kunden nicht. Dies hat große Auswirkungen auf die aggregierte Messgröße β_o , die maßgeblich zur Anpassung der MEP pro Zeitschritt herangezogen wird. Jedoch muss in diesem Fall festgehalten werden, dass sowohl β als auch st_T einen geringen Einfluss auf das betrachtete Gesamtsystem haben. Beide Variablen wirken nur auf die Stoppdichte d_{st} und die Transportzeit pro Tour t_T , die die Gesamttransportzeit t_{GT} beeinflusst.

Die Simulationsergebnisse der weiteren betrachteten Variablen haben durchschnittlich eine mittlere Abweichung von 6 bis 8 % im Vergleich zu den MEP-Ergebnissen. Besonders auffällig ist die geringe Abweichung von 2,6 % der variablen Transportkosten c_L zu den MEP-Simulationsergebnissen. Auch liegen die fixen Transportkosten pro LKW $c_{F,LKW}$ mit 0,021 % sehr nah an den MEP-Simulationsergebnissen.

Die mittlere prozentuale Entwicklung der betrachteten Variablen im System über den Zeithorizont von 2009 bis 2025 wird nun abschließend diskutiert. Nach den Simulationsergebnissen nimmt die Bevölkerung b in Berlin bis 2025 um 5,9 % zu. Die private Güternachfrage pro Kunde GNK_p wächst mit 280 % sehr stark an. Hingegen steigt die gewerbliche Güternachfrage pro Mio. € BIP GNK_o nur um 17 %. Das BIP BIP wird bis 2025 um 78 % ansteigen. Daraus ergibt sich ein Anstieg der privaten Güternachfrage gn_p um 302 % und der gewerblichen Güternachfrage gn_o um 108,3 %. Sowohl die Simulationsergebnisse der MEP als auch der Rückkopplung prognostizieren einen Anstieg der Güterverkehrsnachfrage gvn um über 168 % bis 2025. Hingegen ist der Anstieg der Laufleistung auf der Letzten Meile l_{LM} und des Kraftstoffverbrauchs kv nach den Simulationsergebnissen der Rückkopplung jeweils um ca. 4 % geringer als in der MEP. Der Flottenbestand fb nimmt nach der MEP-Simulation um 168,5 % zu. In der Rückkopplung steigt der Flottenbestand um 1 % weniger als in der MEP-Simulation an. Der Dropfaktor β reduziert sich bis 2025 um 11 % nach der MEP-Simulation. In der Rückkopplung wird eine Abnahme des Dropfaktors von 10,7 % berechnet. Die Sendungen pro Tour st_T nehmen mit -0,49 % geringfügig bis 2025 ab. Die Transportdistanz pro Tour d_T verzeichnet eine Abnahme von -1,38 %. Die Geschwindigkeit \bar{v} bleibt annähernd gleich. Die durchschnittliche Stoppdauer \bar{t}_{st} nimmt um 8,5 % ab. Dementsprechend reduzieren sich die Paketeinheiten pro Stopp und damit einhergehend auch die Dauer pro Stopp. Die Stopps pro Tour st_T steigen nach der MEP-Simulation um 12,4 % an. Die Simulationsergebnisse der Rückkopplung zeigen in Bezug auf st_T einen Anstieg, der um 1 % geringer als in der MEP-Simulation ausfällt. Der abnehmende Dropfaktor führt demzufolge zu mehr Stopps pro Tour. Die Transportzeit pro Tour t_T wächst in der MEP um 6,8 % an, in der Rückkopplung hingegen bleiben die Werte von t_T annähernd gleich. Die Gesamttransportzeit t_{GT} verzeichnet bis 2025 ein Wachstum von 186,8 %. Der Anstieg von t_{GT} fällt in der Rückkopplung dagegen um 17,64 % geringer als in der MEP-Simulation aus. Die Personalkosten c_{PK} nehmen nach der Prognose der MEP bis 2025 um 293,9 % zu. Die Prognose mittels der Rückkopplung geht hingegen von einer Zunahme von c_{PK} um 292,2 % aus. Personalkosten pro Stunde pk_h , die vornehmlich in der MEP berechnet werden und nicht von der Rückkopplung zur MVS beeinflusst werden, steigen bis 2025 um 46,7 %. Die variablen Transportkosten c_L nehmen nach der MEP-Prognose um 310,8 % zu. Der Anstieg von c_L fällt in der Rückkopplung um 8,7 % geringer als in der MEP-Simulation aus. Die fixen Transportkosten c_F verzeichnen ein Wachstum von annähernd 208 % nach der MEP-Prognose. c_F fällt in der Rückkopplungsprognose mit 206,5 % um knapp 1,5 % geringer als in der MEP-Simulation aus. Die Gesamttransportkosten c_T wachsen nach der MEP-Prognose um 274,9 % und nach der Rückkopplungsprognose um 272,4 % an. Die variablen Transportkosten pro km $c_{L,km}$ nehmen in der MEP um 53 % bis 2025 zu.

Das Wachstum von $c_{L,km}$ fällt in der Rückkopplung um 1 % geringer als in der MEP-Prognose aus. Die fixen Transportkosten pro LKW $c_{F,LKW}$ steigen bis 2025 sowohl in der MEP als auch in der Rückkopplung um annähernd 14,7 %. Die CO₂ Emissionen e_1 verzeichnen ein Wachstum von 145,14 % nach der MEP-Prognose. e_1 fällt in der Rückkopplung um 3,3 % geringer als in der MEP aus. Sowohl die Emissionswerte zu HC+NO_x e_2 und zu CO e_3 als auch zu PM₁₀ e_4 verzeichnen ein Negativwachstum bis 2025. Dabei nimmt e_2 um 39 %, e_3 um 82 % und e_4 um 74 % ab. Die mittleren Wachstumsraten der MEP und der Rückkopplung von e_2 , e_3 und e_4 für den Betrachtungshorizont von 2009 bis 2025 weichen jeweils nur marginal voneinander ab.

Tabelle 9.2.: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse.

MA	MV	WK	R^2	% 2009-2025	MAPE MEP/B
SD	Bevölkerung b	Q	0,9998	5,90	
Güternachfrage					
SD	Private Güternachfrage pro Kunde GNK_p	E	1	280,00	
SD	Gewerbliche Güternachfrage pro Mio. € BIP GNK_o	Q	1	17,00	
SD	BIP BIP	Q	1	78,00	
SD	Private Güternachfrage gn_p	E	1	301,90	
SD	Gewerbliche Güternachfrage gn_o	Q	1	108,30	
Güterverkehrsachfrage					
SD	Güterverkehrsachfrage gvn	Q	0,9997	168,52	
RA	Güterverkehrsachfrage gvn	Q	0,9999	168,33	6,05
Laufleistung und Kraftstoffverbrauch					
SD	Laufleistung auf der Letzten Meile l_{LM}	Q	0,9997	168,52	
RA	Laufleistung auf der Letzten Meile l_{LM}	Q	0,9989	164,62	7,22
SD	Adblueverbrauch av	Q	0,9970		
RA	Adblueverbrauch av	Q	0,9970		6,86
SD	Kraftstoffverbrauch kv	Q	0,9995	144,04	
RA	Kraftstoffverbrauch kv	Q	0,9987	140,76	7,56
Flottenbestand					
SD	Flottenbestand fb	Q	0,9997	168,52	
RA	Initialwert Flottenbestand FB_I	Q	0,9872	167,37	7,77
Tourencharakteristika und Transportzeit					
SD	Dropfaktor β	L	1	-11,02	
RA	Dropfaktor β	Q	0,9867	-10,66	96,30
	Sendungen pro Tour s_T	P 3.Gr.	0,8296	-0,49	
	Transportdistanz pro Tour d_T	P 6. Gr.	0,3293	-1,38	
	Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v}	P 6. Gr.	0,5548	0,47	

Fortsetzung von Tabelle 9.2

MA	MV	WK	R ²	% 2009-2025	MAPE MEP/B
	Durchschnittliche Stoppdauer \bar{t}_{st}	Q	0,9867	-8,48	
SD	Stopps pro Tour st_T	Q	1	12,39	
RA	Stopps pro Tour st_T	Q	0,9858	11,39	51,61
SD	Transportzeit pro Tour t_T	Q	1	6,81	
RA	Transportzeit pro Tour t_T	P 4. Gr.	0,4972	0,32	10,79
SD	Gesamtransportzeit t_{GT}	Q	0,9997	186,81	
RA	Gesamtransportzeit t_{GT}	Q	0,9997	169,17	5,39
Transportkosten					
SD	Personalkosten c_{PK}	Q	0,9995	293,87	
RA	Personalkosten c_{PK}	Q	0,9925	292,18	7,77
SD	Personalkosten pro Stunde pk_h	Q	1	46,68	
RA	Personalkosten pro Stunde pk_h	Q	1	46,68	0,00
SD	Variable Transportkosten c_L	Q	0,9992	310,82	
RA	Variable Transportkosten c_L	Q	0,9986	302,13	2,62
SD	Fixe Transportkosten c_F	Q	0,9997	207,95	
RA	Fixe Transportkosten c_F	Q	0,9897	206,54	7,74
SD	Gesamtransportkosten c_T	Q	0,9995	274,90	
RA	Gesamtransportkosten c_T	Q	0,9930	272,38	6,67
SD	Variable Transportkosten pro km $c_{L,km}$	Q	0,9998	52,99	
RA	Variable Transportkosten pro km $c_{L,km}$	Q	0,9892	51,96	4,97
SD	Fixe Transportkosten pro LKW $c_{F,LKW}$	Q	1	14,68	
RA	Fixe Transportkosten pro LKW $c_{F,LKW}$	Q	1	14,65	0,02
Ökologische Effekte					
SD	CO ₂ e_1	Q	0,9995	145,14	
RA	CO ₂ e_1	Q	0,9987	141,85	7,56
SD	HC+NO _x e_2	P 5. Gr.	0,9980	-38,69	
RA	HC+NO _x e_2	P 5. Gr.	0,9937	-39,66	7,30
SD	CO e_3	P 4. Gr.	0,9997	-82,26	
RA	CO e_3	P 4. Gr.	0,9992	-82,53	7,35

Fortsetzung von Tabelle 9.2

MA	MV	WK	R^2	% 2009-2025	MAPE MEP/B
SD	PM ₁₀ e ₄	P 3. Gr.	0,9980	-74,22	
RA	PM ₁₀ e ₄	P 3. Gr.	0,9976	-74,64	7,34

Im Hinblick auf die Auswirkungen der Maßnahmen auf das betrachtete System wird eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse vorgenommen. Dabei werden nur die Effekte hervorgehoben, die eine mittlere prozentuale Abweichung von 1 % zu den Simulationsergebnissen des Basisszenarios aufweisen.

Im Szenario 1 werden die Packstationen zu 100 %, hingegen im Szenario 2 zu 23 % von den Privatkunden als Belieferungsform verwendet. Die Simulationsergebnisse des Flottenbestands FB_I weichen im Durchschnitt um 5,32 % von denen des Basisszenarios ab. Im Szenario 2 ist eine prozentuale Abweichung von 2,23 % zum Basisszenario zu verzeichnen. Sowohl in S1 als auch in S2 liegt FB_I innerhalb des Betrachtungshorizonts unter den Simulationsergebnissen des Basisszenarios. Demzufolge ist in beiden Fällen eine Einsparung der Fahrzeuge durch die Verwendung der Packstationen festzustellen. Die Einsparung an Fahrzeugen ist darauf zurückzuführen, dass die Werte zu s_T innerhalb des Betrachtungshorizonts höher als im Basisszenario ausfallen. Die Simulationsergebnisse der Variablen Güterverkehrsnachfrage gvn , Personalkosten c_{PK} und Fixkosten c_F zeigen in S1 und S2 dieselben mittleren prozentualen Abweichungen zum Basisszenario wie FB_I . Dies lässt darauf schließen, dass diese Variablen maßgeblich von FB_I abhängig sind. Auch bei Sendungen pro Tour s_T fällt die mittlere prozentuale Abweichung mit 5,64 % (S1) und 2,28 % (S2) zum Basisszenario ähnlich zu der von FB_I aus. Dies liegt wiederum am Einfluss von FB_I auf s_T . Bei gvn , c_{PK} und c_F liegen die Simulationsergebnisse jeweils unter denen des Basisszenarios. Durch die Einsparung an Fahrzeugen können dementsprechend Fahrtenaufkommen, Personalkosten und Fixkosten reduziert werden.

Die mittlere Abweichung der Laufleistung auf der Letzten Meile l_{LM} beträgt im Szenario 1 62,241 % und im Szenario 2 12,884 % zum Basisszenario. Annähernd dieselben mittleren prozentualen Abweichungen werden bei den Emissionen $HC+NO_x$ e_2 , CO e_3 und PM_{10} e_4 verzeichnet, die maßgeblich von der Entwicklung von l_{LM} abhängig sind.

Die Simulationsergebnisse zum Kraftstoffverbrauch kv , der maßgeblich von l_{LM} beeinflusst wird, zeigen eine mittlere Abweichung im Szenario 1 von 62,1 % und im Szenario 2 von 12,75 %. Dies wirkt auf die CO_2 Emissionen e_1 , die die gleiche mittlere Abweichung in den beiden Szenarien wie kv verzeichnen. Die mittlere Abweichung vom Adblueverbrauch av liegt bei 57,18 % im Szenario 1 und bei 11,7 % im Szenario 2. Die Simulationsergebnisse sowohl von l_{LM} als auch von kv und av liegen in den Szenarien 1 und 2 unter denen des Basisszenarios. Dies gilt auch für die Emissionen e_1 , e_2 , e_3 und e_4 . Demzufolge können durch die Verwendung von Packstationen die Laufleistung, der Kraftstoff- und Adblueverbrauch sowie die Emissionswerte gesenkt werden.

Der Dropfaktor β ist im Durchschnitt im Szenario 1 um 504,13 % und im Szenario 2 um 22,47 % höher als im Basisszenario. Dies liegt daran, dass β_p bei der Belieferungsform Packstationen höher als bei der Direktzustellung ausfällt.

Die Transportdistanz pro Tour d_T verändert sich in Szenario 1 um 60,14 % und in Szenario 2 um 10,9 % im Vergleich zum Basisszenario. Die Werte von d_T sind hierbei niedriger als im Basisszenario. Dagegen nimmt die durchschnittliche Stoppzeit \bar{t}_{st} um 396,16 % in Szenario 1 und um 17,69 % in Szenario 2 im Vergleich zum Basisszenario zu, da mehr Pakete pro Stopp in die Packstation eingelagert werden müssen.

Demzufolge reduzieren sich die Stopps pro Tour st_T im Mittel um 80,77 % in S1 und um 16,46 % in S2 im Vergleich zu B. Dadurch vermindert sich zudem die Transportzeit pro Tour t_T um 32,65 % in S1 und um 5,62 % in S2 im Vergleich zu B. Damit fällt die Gesamttransportzeit t_{GT} im Durchschnitt um 36,23 % in S1 und um 7,72 % in S2 niedriger als in B aus.

Die variablen Transportkosten c_L sind im Durchschnitt um 42,1 % in S1 und um 9,1 % in S2 im Vergleich zu B niedriger. Dagegen fallen die variablen Kosten pro km $c_{L,km}$ um 55,1 % in S1 und um 4,39 % in S2 höher als in B aus. Hinsichtlich der Gesamttransportkosten c_T ist eine mittlere prozentuale Abweichung von 8,86 % in S1 und von 2,89 % in S2 im Vergleich zu B zu verzeichnen. Durch die Verwendung der Packstationen kann somit eine Einsparung an Transportkosten erzielt werden.

Die Implementierung der Distanzabhängigen Maut (S3) und der Cordon-Maut (S4) hat vornehmlich Auswirkungen auf die Transportdistanz pro Tour d_T . Die mittleren prozentualen Abweichungen liegen bei 1,5 % (S3) und 1,3 % (S4) gegenüber dem Basisszenario. Die weiteren Variablen (u. a. l_{LM} , av , kv , c_L , e_1 , e_2 , e_3 , e_4), die von der Implementierung beider City-Mautkonzepte beeinflusst werden, sind dabei maßgeblich von d_T abhängig. Die mittleren Abweichungen fallen dementsprechend ähnlich zu denen von d_T aus. Die geringen Auswirkungen der beiden City-Mautkonzepte auf das Gesamtsystem lassen sich dadurch erklären, dass die KEP-Dienstleister ihre Fahrten in die Mautzone zur Belieferung ihrer Kunden durchführen müssen. Ihnen bleibt keine Möglichkeit, die Mautzone zur Vermeidung der Mautkosten zu umfahren. Aufgrund dessen lassen sich auch keine positiven Effekte zur Güterverkehrsregulierung durch den Einsatz von City-Mautkonzepten seitens der Verkehrsplanung erzielen. Demzufolge wird der Güterverkehr seitens des Logistikdienstleisters weder reduziert noch verlagert. Der Logistikdienstleister wird die auferlegten Kosten zur Nutzung der Mautzone in Kauf nehmen, um die Belieferungszeitfenster einhalten und dementsprechend die hohe Lieferqualität gewährleisten zu können. Um Mautkosten seitens des Logistikdienstleisters einzusparen, bietet sich nur die Möglichkeit, alternative Fahrzeuge in der Mautzone (u. a. Lastenfahräder, alternative Antriebe) einzusetzen. Falls jedoch die Kosten nur um 1 % im Vergleich zu den Transportkosten ohne Mautkostenanteil zunehmen, wird der Logistikdienstleister weiterhin mit seiner traditionellen Fahrzeugflotte in die Mautzone einfahren.

Tabelle 9.3.: Mittlere prozentuale Abweichungen der Maßnahmenszenarien zum Basis-szenario.

MV	S1/B	S2/B	S3/B	S4/B
Güterverkehrsnachfrage				
<i>gvn</i>	5,326	2,227	0,172	0,236
Laufleistung und Kraftstoffverbrauch				
<i>l_{LM}</i>	62,241	12,884	1,559	1,293
<i>av</i>	57,178	11,703	1,386	1,101
<i>kv</i>	62,094	12,748	1,552	1,283
Flottenbestand				
<i>FB_I</i>	5,320	2,227	0,166	0,241
Tourencharakteristika und Transportzeit				
<i>β</i>	504,133	22,467	0,026	0,026
<i>s_T</i>	5,636	2,278	0,172	0,236
<i>d_T</i>	60,135	10,902	1,463	1,250
<i>v̄</i>	0,579	0,162	0,167	0,141
<i>t̄_{st}</i>	396,164	17,693	0,021	0,020
<i>st_T</i>	80,771	16,461	0,171	0,249
<i>t_T</i>	32,646	5,617	0,562	0,547
<i>t_{GT}</i>	36,228	7,717	0,661	0,582
Transportkosten				
<i>c_{PK}</i>	5,320	2,227	0,167	0,241
<i>pk_h</i>	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>c_L</i>	42,103	9,069	1,026	1,093
<i>c_F</i>	5,320	2,227	0,166	0,241
<i>c_T</i>	8,858	2,885	0,246	0,280
<i>c_{L,km}</i>	55,104	4,388	0,524	0,455
<i>c_{F,LKW}</i>	0,000	0,000	0,000	0,000
Ökologische Effekte				
<i>e₁</i>	62,094	12,748	1,552	1,283
<i>e₂</i>	62,241	12,884	1,559	1,293
<i>e₃</i>	62,241	12,884	1,559	1,293
<i>e₄</i>	62,241	12,884	1,559	1,293

In diesem Kapitel wurden zunächst die wesentlichen Simulationsergebnisse des Basisszenarios im Vergleich zur MEP-Prognose hervorgehoben. Darüber hinaus wurde das Systemverhalten analysiert. Das betrachtete System zeigt vornehmlich quadratisches Verhalten, was auf ein starkes Wachstum des KEP-Marktes hindeutet. Dies liegt vornehmlich an der steigenden Güternachfrage im Privatkundensegment der KEP-Dienstleister. Zudem wurde gezeigt, dass das entwickelte Rückkopplungssystem durch implementierte Maßnahmen beeinflusst, reguliert und stabilisiert werden kann. Mittels der Datenanalyse konnte festgestellt werden, dass die Maßnahmen jeweils unterschiedliche Effekte auf das System vorweisen. In diesem Zuge konnte belegt werden, dass das entwickelte Modell sensitiv auf Maßnahmen reagiert.

10. Fazit

Abschließend wird die vorliegende Arbeit in Kürze zusammengefasst und der entwickelte, methodische Ansatz kritisch bewertet.

10.1. Zusammenfassung

Strukturelle Veränderungen in gesellschaftlichen, ökonomischen und politischen Systemen beeinflussen die Verkehrsnachfrage auf infrastruktureller Ebene, genauso wie individuelle Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer Auswirkungen auf die Strukturen dieser Systeme haben. Die Dynamiken dieser Systeme werden meist in einem langfristigen Betrachtungshorizont beobachtet. Verhaltensänderungen und Entscheidungsprozesse individueller, heterogener Verkehrsteilnehmer auf infrastruktureller Ebene können nur in einem kurzfristigen Betrachtungshorizont untersucht werden.

Die entwickelte Rückkopplung zwischen einer Makroskopischen Extrapolation (MEP) und einer Mikroskopischen Verkehrssimulation (MVS) ist bisher der einzige Verkehrsmodellierungsansatz, der verschiedene dynamische Systeme berücksichtigt. Dieses Modellierungsinstrument ermöglicht eine Strategische Verkehrsprognose für einen langfristigen Betrachtungshorizont und verliert darüber hinaus nicht den räumlichen Kontext. Die langfristigen, strukturellen Veränderungen des Gesamtsystems werden mittels der MEP abgebildet, die MVS dagegen zeigt kurzfristige Veränderungen von Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer auf infrastruktureller Ebene. Mittels der MVS wird der räumliche Kontext zur Anpassung der räumlich beeinflussten Parameter in der MEP herangezogen. Die MEP dient hingegen zur Fortschreibung der Rahmenbedingungen und Raumstrukturen in der MVS. Demzufolge sind die beiden dynamischen Simulationen zur gegenseitigen Anpassung zueinander rückgekoppelt.

Zunächst wurde im Teil I der Rückkopplungsansatz theoretisch fundiert dargelegt und seine Funktionsweise generalisiert. Zudem wurde die Systemarchitektur des Rückkopplungsansatzes, dessen Komponenten und Schnittstellen sowie die notwendigen Schritte zur Entwicklung des Ansatz beschrieben. In diesem Kontext wurde aufgezeigt, dass der Rückkopplungsansatz aus den Recheneinheiten MEP und MVS besteht. Die MVS sind mikroskopische Verkehrsmodelle, die Entitäten im Verkehrssystem auf räumlicher Ebene innerhalb eines kurzfristigen Betrachtungshorizonts abbilden und analysieren. In der MEP werden makroskopische Messgrößen und externe Rahmenbedingungen ohne räumlichen Bezug betrachtet, die einer zeitlichen Entwicklung unterworfen sind. MEP und MVS sind jeweils mit zwei Schnittstellen zur Aggregierung der MVS-Simulationsergebnisse und zur Disaggregierung der MEP-Simulationsergebnisse rückgekoppelt.

Die MVS benötigt zur Initialisierung raumbezogene Daten, die mittels der Disaggregation der MEP-Simulationsergebnisse je Zeitschritt fortgeschrieben werden. Die MEP hingegen kann externe Rahmenbedingungen, u. a. externe Einflussssysteme, auf hoch-aggregierter Ebene abbilden. Ferner müssen die Parameter der MEP mit historischen Zeitreihenwerten kalibriert werden, um eine valide Extrapolation des Systemverhaltens zu gewährleisten.

Im Teil II wurden die verwendeten Modellierungsinstrumente für den Rückkopplungsansatz vorgestellt. Als MEP wurde der System Dynamics Ansatz nach Forrester [49] verwendet. In diesem Rahmen wurden die theoretischen Grundlagen dieses Ansatzes erläutert und das methodische Vorgehen zur Entwicklung eines System Dynamics Modells präsentiert. Zudem wurde auf die Methode zur Kalibrierung des System Dynamics Ansatzes eingegangen. Ferner wird als MVS die mikroskopische, agentenbasierte Verkehrssimulation MATSim von Balmer et al. [8] genutzt. Das Modellierungs- und Simulationsverfahren von MATSim wurde im Teil II im Detail dargelegt. Abschließend zu diesem Teil wurde das methodische Vorgehen zur Entwicklung des Rückkopplungsansatzes aufgezeigt.

Im Teil III wurde auf das Fallbeispiel zum KEP-Markt in Berlin eingegangen. Dazu wurde zunächst der Wirtschaftsverkehr definiert und die Güterverkehrsmärkte differenzierter betrachtet und analysiert. Danach wurde der KEP-Markt anhand dessen Merkmale charakterisiert, um basierend darauf die Problemstellung zum KEP-Verkehr in urbanen Räumen abzuleiten. (siehe Kapitel 4) In Kapitel 5 wurde das entwickelte SD-Modell, die MVS und die Kopplung zum Fallbeispiel mathematisch formalisiert. Darauf aufbauend wurde in Kapitel 6 gezeigt, welche Daten für das SD-Modell und die MVS verwendet und wie diese zu diesem Zweck aufbereitet wurden. Die Kalibrierungsergebnisse des SD-Modells wurden in Kapitel 7 aufgezeigt und im Detail diskutiert. Die Schritte Formalisierung 5, Parametrisierung 6 und Kalibrierung 7 stellten die Grundlage zur Entwicklung des Basis-szenarios dar. In Kapitel 8 wurden die entwickelten Maßnahmenszenarien vorgestellt, die das betrachtete Gesamtsystem um ausgewählte verkehrspolitische und logistische Maßnahmen zur Regulierung des KEP-Verkehrs in Städten erweitern. Dabei handelt es sich um die Maßnahmen Packstation, Distanzabhängige Maut und Cordon-Maut. In diesem Kapitel wurden wiederum die durchgeführten Schritte Formalisierung, Parametrisierung und Kalibrierung der entwickelten Szenarien beschrieben.

In Kapitel 9 wurden die finalen Simulationsergebnisse der entwickelten Strategischen Verkehrsprognose ausgewertet und diskutiert. Hierbei wurden die Ergebnisse der Maßnahmenszenarien mit den Ergebnissen des Basis-szenarios verglichen, um damit die Wirkungen der ausgewählten Maßnahmen auf das Gesamtsystem KEP-Verkehr in Städten aufzuzeigen.

10.2. Bewertung des entwickelten Kopplungsansatzes

Final wird der entwickelte Rückkopplungsansatz einer kritischen Bewertung unterzogen. Die Ausgangshypothese dieser Arbeit war, dass der generalisierte Rückkopplungsansatz operabel für die praktische Anwendung in der strategischen Verkehrsplanung sein muss.

Um dieser Fragen nachzugehen, werden die Vor- und Nachteile der verwendeten MEP und MVS diskutiert, um basierend darauf die Stärken und Schwächen des entwickelten Rückkopplungsansatzes herauszustellen.

MEP Die *MEP* sollte auf makroskopischer Ebene eine Analyse eines Gesamtsystems sowie Hochrechnungen und Prognosen für einen mittel- und langfristigen Betrachtungshorizont ermöglichen. Als MEP wurde der systemdynamische Modellierungsansatz nach Forrester [49] herangezogen. Dabei handelt es sich um ein *makroskopisches* Modell auf *aggregierter Ebene*. Mittels SD kann ein *langfristiger Betrachtungshorizont* analysiert werden. Demzufolge ist er für die *strategische Planungsebene* von Relevanz. Dieser methodische Ansatz eignete sich zur Abbildung des komplexen Systems KEP-Markt in Berlin und zur Durchführung von Langzeitprognosen. Eine Schwäche von System Dynamics ist jedoch, dass der Einfluss des räumlichen Kontexts auf das Verkehrssystem fehlt und damit nicht berücksichtigt wird. Daher ist bei der SD-Modellierung bedingt durch das Aggregationsniveau kein *Raumbezug* gegeben. SD bildet nur das übergeordnete Systemverhalten ab. Aus diesem Grund muss dieser methodische Ansatz für langfristige Prognosen gewissenhaft verwendet werden. Diese Ansätze prognostizieren häufig instabiles Verhalten eines Verkehrssystems. Dies liegt daran, dass die Systeme keine Wachstumsgrenzen haben und damit exponentiell anwachsen können. In der SD-Modellierung können Veränderungen des *Systemverhaltens* im Zeitverlauf untersucht werden. Auch können *politische Maßnahmen* in SD implementiert und deren Wirkungen auf das System abgeschätzt werden. Bei SD wirken die Maßnahmen auf das gesamte System. Die Effekte der Maßnahmen werden langfristig abgeschätzt. Der *Datenbedarf* für derartige Modelle ist relativ hoch. Zur Parametrisierung sind historische Zeitreihenwerte notwendig, die möglichst weit in die Vergangenheit reichen sollten, um valide Aussagen für die Zukunft treffen zu können. Die *Qualität der verwendeten Daten* zur Parametrisierung des SD-Ansatzes war hoch. Das SD-Modell ist vorwiegend sekundädatengestützt. Dementsprechend basiert das entwickelte SD-Modell auf wenigen Annahmen des Modellierers. Die *Kalibrierung* des SD-Modells wurde durchgeführt, um ein valides Systemverhalten und valide Prognosen zu garantieren. Durch das hohe Aggregationsniveau von SD ist eine Kalibrierung leicht umsetzbar. Der Nachteil an dem Ansatz ist, dass die Simulationsergebnisse, in diesem Fall die Langzeitprognosen, des Fallbeispiels nicht *validiert* werden können. Die Simulationsergebnisse des SD-Modells konnten nicht mittels Werten vergleichbarer Datensätze aus unabhängigen Quellen validiert werden, da die Datenstrukturen anderer Datenquellen meist ein anderes Format oder eine andere Forschungsfrage beantworten sollen. Zudem kann die Gültigkeit der Prognose nicht überprüft werden. Die historischen Zeitreihendaten zur Parametrisierung und Kalibrierung der MEP müssten in diesem Zuge in den nächsten 10 Jahren in regelmäßigen Abständen erhoben,

die Datenbasis fortgeschrieben und danach überprüft werden, ob die Voraussagen der tatsächlichen Entwicklung entsprechen. Damit könnten die Simulationsergebnisse des Rückkopplungsansatzes von 2016 bis 2025 auf ihre Gültigkeit hin validiert werden. Auch war der Nachteil bezogen auf die Parameter bzw. die Sekundärdatenerhebung, dass zu dem Fallbeispiel nur Zeitreihenwerte für einen Zeitraum von sieben Jahren vorhanden waren. Um langfristige Prognosen durchführen zu können, wären historische Zeitreihenwerte von einem längerem Zeitraum notwendig gewesen. Die Computerhardware zur Simulation des SD-Modells stellt kein Problem dar. Die *Simulationslaufzeit* eines SD-Modells für einen Zeitraum von 2009 bis 2025 dauert höchstens zwei Sekunden. Aus diesem Grund gibt es keine *Arbeitsspeicherprobleme*.

MVS Die MVS sollte einerseits die Abbildung des Verhaltens heterogener Individuen im System und andererseits die Darstellung individueller, kurzfristiger Entscheidungsprozesse auf der räumlichen Ebene erlauben. Aus diesem Grund wurde das verhaltensensitive Verkehrsnachfragemodell MATSim (*Multi-Agent Transport Simulation*) nach Balmer et al. [8] als MVS herangezogen. MATSim als MVS ist eine *mikroskopische, agentenbasierte Verkehrssimulation auf disaggregierter Ebene*. Mittels MATSim können Verkehre innerhalb *kurzfristiger Betrachtungszeiträume* (u. a. 1 Tag, 1 Woche) abgebildet werden. Exakte zeitpunktgenaue Prognosen können mittels der MVS durchgeführt werden, jedoch keine langfristigen Prognosen. Aufgrund dessen eignet sich dieses Modellierungsverfahren zur Abbildung kurzfristiger Entscheidungsprozesse. Damit wird die *taktische Planungsebene* abgedeckt. MATSim stellt das Verhalten heterogener Akteure im Verkehrssystem auf infrastruktureller Ebene dar. Demzufolge ist einerseits der *Raumbezug* und andererseits die *Verhaltenssensitivität* des Ansatzes gegeben. Der Detailgrad der räumlichen Auflösung bei der disaggregierten MVS ist sehr hoch. In Bezug auf die Verhaltenssensitivität gelingt in der MVS die Beeinflussung des Verhaltens auf einzelne Agenten. In MATSim können ausgewählte Maßnahmen zur Wirkungsabschätzung implementiert werden. Bei der MVS wirken die Maßnahmen auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer bzw. der Agenten. Ferner ist der *Datenbedarf* bei der MVS relativ hoch, was am Aggregationsniveau liegt. Aufgrund fehlender Daten scheitert häufig die Parametrisierung verhaltensbezogener Parameter von agentenbasierten Modellierungsansätzen. Vornehmlich zur Initialisierung der synthetischen Welt in MATSim muss ein hoher Erhebungsaufwand betrieben werden, um Infrastruktur und Standorte der Quellen und Senken des Verkehrssystems standortgenau und georeferenziert abbilden zu können. Zudem erhalten die Verkehrsteilnehmer Merkmale und Verhaltensmuster, die dementsprechend extern vorgegeben werden müssen. Eine Kalibrierung einer tagesbasierten Verkehrssimulation ist bis dato nicht möglich. Grund dafür ist, dass Verhaltensmuster der Verkehrsakteure innerhalb eines Tages für den Untersuchungsraum bekannt sein müssen. Derartige disaggregierte Datensätze liegen bislang nicht vor. Demzufolge fehlt bei der MVS die detaillierte, empirische Datengrundlage, um die Modellergebnisse zu kalibrieren. Daher konnte *Kalibrierung* der MVS im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt werden, da das konkrete Verkehrsverhalten im Netz nicht bekannt ist. Aufgrund dessen kann zudem keine *Validierung* vorgenommen werden. Dennoch weisen

die verwendeten *Sekundärdaten* zum Aufbau der initialen Welt eine gute *Qualität* auf. In Bezug auf MATSim und Jsprit als Referenzmodell für eine mikroskopische Verkehrssimulation muss erwähnt werden, dass 10 Iterationen in MATSim und 200 Iterationen in Jsprit pro Adapteriteration zur Optimierung des Verkehrs vorgesehen sind, um daraus die optimalen Lösungen auszuwählen. Dies stellt jedoch den Modellierer eines derartig großen Systems, das in der vorliegenden Arbeit betrachtet wurde, vor ein Laufzeit- und Hardwareproblem.

Rückkopplungsansatz Mittels der entwickelten Rückkopplung zwischen den Modellierungsinstrumenten MEP und MVS sind Analysen großer, komplexer und dynamischer Verkehrssysteme auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene für einen langfristigen Betrachtungshorizont möglich. Es können Langzeitprognosen durchgeführt, sowie die zeitpunktgenaue, synthetische Welt der MVS auf räumlicher Ebene fortgeschrieben werden. Damit wird sowohl die taktische, operative als auch die strategische Planungsebene betrachtet. Der Raumbezug ist durch die MVS gegeben. Verhaltenssensitivität in Bezug auf die Veränderung des Gesamtsystems und in Bezug auf das Verkehrsverhalten einzelner Agenten im Verkehrssystem wird durch den Rückkopplungsansatz gewährleistet. Der Rückkopplungsansatz erlaubt darüber hinaus, Maßnahmen zu implementieren und die Wirkungen auf das betrachtete System zu testen. Der Datenbedarf zur Parametrisierung des Gesamtansatzes ist sehr hoch, da zwei Modelle parametrisiert werden müssen. Dennoch basiert der entwickelte Rückkopplungsansatz auf sehr wenigen Annahmen und ist vornehmlich sekundärdatengestützt. Die Kalibrierung der Parameter wird mittels der MEP durchgeführt. Jedoch scheitert die Validierung aufgrund fehlender Vergleichsdatenbanken aus unabhängigen Quellen. Die Simulationslaufzeit und der Arbeitsspeicherbedarf nehmen mit der Länge des Betrachtungszeitraums stetig zu. Dies liegt vornehmlich an der verwendeten MVS. Wenn MATSim und Jsprit jeweils auf 10 Iterationen pro Adapteriteration eingestellt werden, ergeben sich *Simulationslaufzeiten* von mindestens zwei bis drei Wochen bei einem betrachteten Zeithorizont von 2009 bis 2025. Dementsprechend müssen 16 Rückkopplungsiterationen zwischen MEP und MVS sowie jeweils 10 MATSim- und 10 Jsprit-Iterationen pro Rückkopplung durchgeführt werden. Dadurch ergibt sich das nächste Problem — der immens hohe *Arbeitsspeicherbedarf*. Pro Rückkopplungsiteration werden die gewonnenen Daten der Iterationen von MATSim und Jsprit vorgehalten, um daraus die besten Simulationswerte auszuwählen. Um diese großen Datenmengen pro Rückkopplungsiteration vorhalten zu können, ist ein großer Arbeitsspeicher zwingend notwendig. Ansonsten kommt es zu Abbrüchen in der Simulation, da die Kapazitäten des Arbeitsspeichers überschritten und die Daten dementsprechend nicht von diesem gespeichert werden können. Aufgrund dessen wurde für das Fallbeispiel dieser Arbeit festgelegt, dass sowohl Jsprit als auch MATSim nur eine Iteration pro Adapteriteration ausführen. Dies hat den Vorteil, dass weniger Daten pro Zeitschritt vom Arbeitsspeicher zur finalen Analyse vorgehalten werden müssen. Damit wurde einerseits eine Simulationslaufzeit von 10 Stunden bei 16 Rückkopplungsiterationen für den Betrachtungszeitraum von 2009 bis 2025 erzielt und andererseits der Arbeitsspeicherbedarf reduziert.

Fallbeispiel Im Rahmen eines *Fallbeispiels* zum KEP-Verkehr in Berlin wurde die *Operabilität* des generalisierten Rückkopplungsansatzes (siehe Kapitel 2.4, 2.5) verifiziert. Dabei wurde das grundlegende, methodische Vorgehen sowie die Funktionsweise und -prinzipien des entwickelten Ansatzes demonstriert (vgl. Teil III).

Mittels des entwickelten SD-Modells als *MEP* kann das komplexe Gesamtsystem KEP-Markt in Berlin auf aggregierter Ebene abgebildet und die dynamische Entwicklung dieses Marktes für einen langfristigen Betrachtungshorizont von 16 Jahren prognostiziert werden. Das entwickelte SD-Modell besteht einerseits aus aggregierten Verkehrskenngrößen und andererseits aus externen *Rahmenbedingungen*. Hierbei wird die zeitliche Entwicklung der verkehrsimmanenten Kenngrößen – Flottenbestand, Güterverkehrsnachfrage, Laufleistung – beschrieben. Diese Verkehrskenngrößen sind von externen Rahmenbedingungen abhängig. Diese Rahmenbedingungen unterliegen einer zeitlichen Entwicklung und werden in aggregierter Form betrachtet. Eine zeitliche Funktion der Rahmenbedingungen kann den einzelnen Entitäten in der MVS nicht zugewiesen werden. Aus diesem Grund werden die zeitlichen Entwicklungen dieser Rahmenbedingungen auf makroskopischer Ebene in aggregierter Form mittels des SD-Modells betrachtet. Das entwickelte SD-Modell dient demzufolge zur Erklärung der Auswirkungen der externen Rahmenbedingungen auf die Entwicklung des KEP-Verkehrs. Die betrachteten Rahmenbedingungen sind u. a. die soziodemographische Entwicklung der Bevölkerung, die auf die Güternachfrage privater Kunden der KEP-Dienstleister wirkt. Die gewerbliche Güternachfrage ist abhängig von der Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts. Die private und gewerbliche Güternachfrage als Rahmenbedingung hat maßgeblichen Einfluss auf die Entwicklung des Flottenbestands und der Güterverkehrsnachfrage. Dabei ist die Güterverkehrsnachfrage von der Güterverkehrskapazität bzw. der bestehenden Flottengröße abhängig. Die Entwicklung der Güterverkehrsnachfrage wird auf die Laufleistung auf der Letzten Meile und den Kraftstoffverbrauch. Tourencharakteristika und die Entwicklung der Transportzeit können die Entwicklung der Güterverkehrskapazität und der -nachfrage sowie der Laufleistung auf der Letzten Meile im Zeitverlauf verändern. Die Transportkosten werden durch die Entwicklung der Laufleistung und des Flottenbestands beeinflusst. Die Entwicklung der Abgasemissionen ist abhängig von der Entwicklung der Laufleistung auf der Letzten Meile und des entsprechenden Kraftstoffverbrauchs. Neben der soziodemographischen Entwicklung der Bevölkerung und der Güternachfrage stellen die Entwicklung der Transportkosten- und Abgasemissionen externe Rahmenbedingungen des betrachteten Systems dar. Ferner können mittels des entwickelten SD-Ansatzes die Wirkungen der Maßnahmen Packstationen, Cordon-Maut und Distanzabhängige Maut auf den KEP-Verkehr langfristig abgeschätzt und prognostiziert werden. Die *Parameter* der Extrapolationsfunktionen bzw. Differentialgleichungssysteme der SD-Submodule Bevölkerung, Güternachfrage, Transportkosten und Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage sowie der ausgewählten Maßnahmen Packstationen, Cordon-Maut und Distanzabhängige Maut wurden auf historische Zeitreihenwerte kalibriert (siehe Kapitel 7, 8.3), um die Verhaltensgültigkeit der Extrapolation zu gewährleisten.

MATSim/Jspirt als *MVS* bildet individuelle, kurzfristige Entscheidungsprozesse und das Verhalten heterogener Entitäten bzw. Individuen des KEP-Marktes in Berlin – priva-

te und gewerbliche Kunden sowie die daraus resultierende Güterverkehrsnachfrage des KEP-Dienstleisters – auf disaggregierter, räumlicher Ebene in einem kurzfristigen Betrachtungshorizont, für einen typischen Tag, ab. Zudem können die Wirkungen der implementierten Maßnahmen (u. a. Packstationen, Cordon-Maut, Distanzabhängige Maut) auf den KEP-Verkehr mittels MATSim/Jspit zeitpunktgenau abgeschätzt und netzbezogen analysiert werden. Um MATSim/Jspit initialisieren zu können, werden *raumbezogene Daten* zum betrachteten Verkehrssystem des Untersuchungsraumes benötigt. Dementsprechend wurde das betrachtete KEP-Verkehrssystem, bestehend aus Verkehrsangebot – Infrastrukturnetzwerk – und -nachfrage – Standorte der Distributionszentren und Abholstellen sowie der privaten und gewerblichen Kunden der KEP-Dienstleister – einmalig erhoben. Die betrachteten Entitäten – Quellen und Senken der Güterverkehrsnachfrage, die zu befördernden Pakete und die verwendeten LKW mit ihren jeweiligen ökonomischen und ökologischen Charakteristika – sind hierbei Grundlage zur Initialisierung der Verkehrsnachfrage.

In der Schnittstelle *Aggregation* werden die einzelnen Messgrößen, die mittels der MVS erhoben wurden, zusammengefasst. Hierbei werden vornehmlich Verkehrskennwerte für die MEP aufbereitet, die das Verkehrssystem beschreiben. Dabei handelt es sich um Kennwerte zur Verkehrsnachfrage sowie deren Charakteristika, die von räumlichen und infrastrukturellen Gegebenheiten sowie dem Verkehrsgeschehen abhängig sind. Diese Kennwerte mit räumlichen und verkehrlichen Bezug sind in diesem Fallbeispiel Tourencharakteristika des Güterverkehrs. Mittels MATSim/Jspit werden die Fahrten der Agenten mit ihren jeweiligen Fahrtenmustern erhoben, die zunächst in disaggregierter Form je Entität vorliegen. Dabei handelt es sich um die zu erreichende Geschwindigkeit auf dem Infrastrukturnetz, Anzahl der durchgeführten Fahrten, zurückgelegte Distanzen und Fahrzeiten sowie Anzahl der Stopps. In der Aggregation werden die disaggregierten Daten zu Durchschnittswerten zusammengefasst. Die aggregierten Messgrößen in diesem Fallbeispiel sind u. a. Anzahl der Fahrten, Transportdistanz pro Tour, Sendungen pro Tour, durchschnittliche Stoppdauer, Dropfaktor und Durchschnittsgeschwindigkeit. Diese Durchschnittswerte stellen nun aggregierte Messgrößen zur Analyse des Verkehrssystems zu einem bestimmten Zeitpunkt dar. Diese Messgrößen werden zur Fortschreibung dieser Parameter in der MEP herangezogen. Diese Parameter sind zwar auch Bestandteil der MEP, sind jedoch nur als Konstanten ohne räumlichen Bezug und zeitliche Entwicklung in der MEP integriert. Demzufolge kann damit die MEP durch die räumlich und verkehrlich abhängigen Messgrößen, die einer Begrenzung auf räumlicher Ebene unterworfen sind, stabilisiert werden.

In der Schnittstelle *Disaggregation* dienen die aggregierten, extrapolierten Rahmenbedingungen des SD-Modells zur Fortschreibung der betrachteten Entitäten und deren Charakteristika im KEP-Verkehr auf disaggregierter, räumlicher Ebene in der MVS. Die Rahmenbedingungen sind in diesem Fallbeispiel u. a. Bevölkerung, private und gewerbliche Güternachfrage, Transportkosten sowie Kraftstoffverbrauch und Konversionsfaktoren der Abgasemissionen pro Kilometer. Diese ausgewählten, aggregierten Rahmenbedingungen sind demzufolge einer zeitlichen Entwicklung unterworfen und dienen vornehmlich der Initialisierung der MVS.

Demzufolge kann mittels des Rückkopplungsansatzes für das vorliegende Fallbeispiel die Entwicklung des KEP-Marktes in Berlin auf aggregierter und disaggregierter Ebene langfristig von 2009 bis 2025 abgeschätzt werden.

Die Simulationsfähigkeit wurde damit bewiesen, dass die Ergebnisse der Simulation aufgezeigt und im Detail diskutiert wurden. Hierbei zeigte sich, dass sowohl die Entwicklungsgraphen der MEP als auch die des Rückkopplungsansatzes quadratisches Wachstum aufweisen. Daraus lässt sich schließen, dass das betrachtete System stark wächst. Das Wachstum fiel jedoch beim Entwicklungsgraphen des Rückkopplungsansatzes im Vergleich zu den MEP-Simulationsergebnissen geringer aus. Auf Grundlage dessen lässt sich ableiten, dass die MEP durch die Begrenzung auf räumlicher Ebene mittels der MVS stabilisiert wurde. Der Scheitelpunkt, der eine Dämpfung des Systems einleitet, wurde im betrachteten Zeithorizont von 2009 bis 2025 nicht erreicht. Hierbei stellt sich die Frage, wann eine Dämpfung nach 2025 einsetzt und ob sich diese überhaupt einstellt. Dazu müssen längere Prognosen bis 2100 durchgeführt werden, um den zeitlichen Verlauf des Systemverhaltens abschätzen zu können. Damit könnte die Stabilität des Systemverhaltens verifiziert werden.

Ferner ist das Fallbeispiel zum KEP-Markt in Berlin auf weitere urbane Räume übertragbar. Zu diesem Zweck müssen stadtspezifische Daten zur Raumstruktur (u. a. Bevölkerungsstruktur, Wirtschaftsstruktur, Verteilung der Distributionszentren, Paketshops, Postfilialen, Packstationen) in der MVS sowie zu den externen Rahmenbedingungen (u. a. Bevölkerung, BIP) in der MEP für andere Städte erhoben sowie MVS und MEP mittels dieser Daten parametrisiert werden. In der MEP muss zudem eine Kalibrierung mittels dieser historischen Zeitreihenwerte erfolgen. Weitere Systemkomponenten bzw. Parameter der MEP und MVS sind in Bezug auf den KEP-Markt allgemeingültig und nicht standort- bzw. stadtspezifisch. Demzufolge ist die *Transferierbarkeit* des Fallbeispiels auf weitere Untersuchungsräume grundlegend gegeben.

Auch konnte der Widerstand auf infrastruktureller Ebene, die Verkehrsdichte, nur durch verminderte Durchschnittsgeschwindigkeiten pro Kante im Netzwerk erreicht werden. Dadurch veränderte sich die Messgröße Durchschnittsgeschwindigkeit nur marginal und blieb relativ konstant. Eine Verkehrsbelastung mit Personenverkehrs- und ÖPNV-Agenten wurde dabei nicht generiert. Dies könnte in weiteren Schritten Berücksichtigung finden, um den Einflussfaktor Verkehrsdichte bzw. erreichte Durchschnittsgeschwindigkeit im Netz auf die Simulationsergebnisse des Rückkopplungsansatzes zu verstärken.

Die räumliche Verteilung Bevölkerung nach Altersklassen von Berlin wurde im Rahmen dieser Arbeit als Grundlage der synthetischen Welt für MATSim verwendet. Die Struktur und demographischen Charakteristika der Bevölkerung der MVS konnten mittels der Rückkopplung zur MEP pro Zeitschritt angepasst und dementsprechend fortgeschrieben werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden zudem verkehrsplanerische und logistische Maßnahmen definiert. Mittels Szenarienanalysen können die Wirkungen dieser Maßnahmen auf die zukünftige Entwicklung des KEP-Verkehrs abgeschätzt werden, welche sowohl für die Verkehrspolitik als auch für die Logistik von Interesse sind. Durch die implementierten Maßnahmen kann das System demzufolge reguliert und stabilisiert werden.

Tabelle 10.1.: Bewertung des entwickelten Kopplungsansatzes.

Modellierungsansätze	SD als MEP	MATSim als MVS	Rückkopplungsansatz
Eigenschaften			
Aggregationsniveau	aggregiert	disaggregiert	aggregiert/disaggregiert
Analysemaßstab	makroskopisch	mikroskopisch	makroskopisch/mikroskopisch
Zeitlicher	langfristig	kurzfristig	kurz-/langfristig
Analysehorizont			
Planungsebene	strategisch	taktisch/operativ	taktisch/operativ/strategisch
Raumbezug	–	+	+
Verhaltenssensitivität	+	+	+
Maßnahmensensitivität	+	+	+
Datenbedarf	–	–	–
Datenqualität	+	+	+
Kalibrierung	+	–	+/-
Validierung	–	–	–
Simulationslaufzeit	+	–	–
Arbeitsspeicherbedarf	+	–	–
Operabilität	+	+	+
Transferierbarkeit	+	+	+

Der entwickelte Rückkopplungsansatz für das Fallbeispiel zum KEP-Verkehr in Berlin erfüllt dementsprechend folgende Funktionen.

- Abbildung, Beschreibung und Erklärung der Interdependenzen zwischen allen beteiligten Akteuren im System urbaner KEP-Verkehr
- Langfristige Zeitverlaufsprognosen der Entwicklung der externen Rahmenbedingungen und der daraus resultierenden Auswirkungen auf die KEP-Verkehrsnachfrage auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene
- Langfristige Zeitverlaufsprognose der Maßnahmenwirkungen auf die KEP-Verkehrsnachfrage auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene
- Fortschreibung der externen Rahmenbedingungen Bevölkerung, private und gewerbliche Güternachfrage, Transportkosten sowie Kraftstoffverbrauch und Konversionsfaktoren der Abgasemissionen pro Kilometer in der MVS auf mikroskopischer Ebene mittels der Rückkopplung zur MEP
- Erhebung der räumlich abhängigen Messgrößen mittels der MVS zur Fortschreibung dieser Verkehrskennwerte in der MEP auf makroskopischer Ebene

In der Tabelle 10.1 werden die wesentlichen Charakteristika sowie die Stärken und Schwächen der MEP, der MVS und des Rückkopplungsansatzes im Überblick aufgezeigt.

Finale Bewertung des Gesamtansatzes Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das entwickelte, strategische Modellierungsinstrument generalisiert sowie die grundlegende Funktionalität und die praktische Umsetzung mittels eines Fallbeispiels demonstriert. Der Ansatz ist dazu geeignet, das Verhalten großer, komplexer Verkehrssysteme auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene in einem langfristigen Betrachtungshorizont zu analysieren. Der Ansatz bedient sich dabei nicht nur verschiedener Aggregationsniveaus und arbeitet dementsprechend mit zwei verschiedenen Analysemaßstäben, er berücksichtigt darüber hinaus zwei zeitliche Betrachtungshorizonte. Zudem ermöglicht dieser Ansatz, Effekte externer Rahmenbedingungen, wie politische Eingriffe, auf das betrachtete System einerseits langfristig, aber auch zeitpunktgenau auf infrastruktureller Ebene abzuschätzen.

Der Rückkopplungsansatz ist zur Stabilisierung der Strategischen Verkehrsprognose bzw. zur Analyse eines Verkehrssystems innerhalb eines langfristigen Betrachtungshorizonts notwendig. Die Rückkopplung der MEP mit einer MVS ist dabei für valide strategische Verkehrsprognosen maßgeblich. Die MVS korrigiert und reguliert das Systemverhalten der MEP pro Zeitschritt mittels der kurzfristigen, dynamischen Simulation auf infrastruktureller Ebene. Somit ist der räumliche Kontext, in diesem Fall die Verkehrsinfrastruktur, ein relevanter Faktor, der für langfristige Prognosen nicht ignoriert werden darf. Demzufolge wird die Prognosefähigkeit der MEP durch den räumlichen Einfluss der MVS erhöht.

Jedoch kann die MVS nur zeitpunktgenaue bzw. kurzfristige Prognosen durchführen. Mittels der MVS können die Verhaltensänderungen der Verkehrsteilnehmer auf infrastruktureller Ebene bedingt durch strukturelle Veränderungen berücksichtigt werden. Diese strukturellen Veränderungen auf der räumlichen Ebene können mittels der MVS jedoch nicht abgebildet werden. Zur Fortschreibung raumbezogener Daten der MVS dient die Rückkopplung zur MEP.

Der entwickelte Rückkopplungsansatz ermöglicht eine Strategische Verkehrsprognose für einen langfristigen Betrachtungshorizont und verliert darüber hinaus nicht den räumlichen Kontext. Die langfristigen, strukturellen Veränderungen des Gesamtsystems werden mittels der MEP abgebildet, die MVS dagegen zeigt kurzfristige Veränderungen von Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer auf infrastruktureller Ebene. Die Kalibrierung der MEP ist in diesem Zuge für valide Zukunftsprognosen maßgebend.

Demzufolge ist der Rückkopplungsansatz als Grundlage für Entscheidungsprozesse in der strategischen Verkehrs- und Logistikplanung geeignet und einsetzbar.

Literaturverzeichnis

- [1] Amt für Statistik Berlin: *Anzahl der Personen nach Altersjahrgängen in Berlin am 9.Mai 2011 auf Blockebene*. Potsdam, 2016
- [2] Amt für Statistik Berlin-Brandenburg: *Bevölkerungsstand Berlin 2005-2015*. Online. <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/webapi/jsf/tableView/tableView.xhtml#>. Version: 2016. – Abgerufen am 09.11.2016
- [3] Amt für Statistik Berlin-Brandenburg: *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen (VGR)*. Online. https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/Statistiken/statistik_SB.asp?Ptyp=700&Sageb=82001&creg=BBB&anzwer=2. Version: 2016. – Abgerufen am 27.10.2016
- [4] Arndt, W.-H. : *Optimierungspotenziale im Wirtschaftsverkehr durch bestellerseitige Kooperation. Untersuchung des Ansatzes einer Beschaffungs-/Bestellerkooperation als ein Instrument für eine effiziente und stadtverträgliche Gestaltung des Wirtschaftsverkehrs*, Technische Universität Berlin, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme, Diss., 2010
- [5] Arndt, W.-H. : Development of urban commercial transport and challenges for the urban transportation planning. In: *International Conference on Commercial/Goods Transport in Urban Areas*. Berlin : Deutsches Institut für Urbanistik, 2012
- [6] Aschauer, G. ; Gronalt, M. ; Mandl, C. : Modelling interrelationships between logistics and transportation operations: A system dynamics approach. In: *Management research review* 38 (2015), Nr. 5, S. 505–539
- [7] Balmer, M. ; Raney, B. ; Nagel, K. : Adjustment of activity timing and duration in an agent-based traffic flow simulation. In: *Progress in activity-based analysis* (2005), S. 91–114
- [8] Balmer, M. ; Rieser, M. ; Meister, K. ; Charypar, D. ; Lefebvre, N. ; Nagel, K. ; Axhausen, K. : MATSim-T: Architecture and simulation times. In: *Multi-agent systems for traffic and transportation engineering* (2009), S. 57–78
- [9] Beagan, D. ; Fischer, M. ; Kuppam, A. : Quick Response Freight Manual II. Department of Transportation. Federal Highway Administration / FHWA-HOP-08-010 EDL. 2007. – Forschungsbericht
- [10] Beckmann, K. J. ; Hesse, M. ; Scholl, B. : Grundprinzipien einer nationalen Strategie für eine integrierte Raum- und Verkehrsentwicklung — Schlussfolgerungen und Empfehlungen des Arbeitskreises. In: *Neue Rahmenbedingungen, Herausforderungen und Strategien für die großräumige Verkehrsentwicklung* (2010), S. 35
- [11] Ben-Akiva, M. E. ; Lerman, S. R.: *Discrete choice analysis: theory and application to travel demand*. Bd. 9. Cambridge : MIT press, 1985
- [12] Bertalanffy, L. von: *Problems of life: An evaluation of modern biological thought*. London : Watts & Co, 1952
- [13] Bertalanffy, L. von: *General system theory: Foundations, development, applications*. Rev. ed. New York : Braziller, 1968
- [14] Bertalanffy, L. von: *Forschung und Information*. Bd. 12: *Systemtheorie*. Berlin : Colloquium-Verlag, 1972
- [15] Bockermann, A. ; Meyer, B. ; Omann, I. ; Spangenberg, J. H.: Modelling sustainability: Comparing an econometric (PANTA RHEI) and a systems dynamics model (SuE). In: *Journal of policy modeling* 27 (2005), Nr. 2, S. 189–210

- [16] Bogdanski, R. : *Nachhaltige Stadtlogistik durch Kurier-, Express- und Paketdienste. Studie über die Möglichkeiten und notwendigen Rahmenbedingungen am Beispiel der Städte Nürnberg und Frankfurt am Main*. Berlin, 2015
- [17] Bogdanski, R. : *Innovationen auf der Letzten Meile – Kurier-, Express- und Paketdienste. Bewertung der Chancen für die nachhaltige Stadtlogistik von morgen. Nachhaltigkeitsstudie 2017 im Auftrag des Bundesverbandes Paket- und Expresslogistik e.V. (BIEK)*. Berlin, 2017
- [18] Bossel, H. : *Systemzoo*. Bd. 2: *Klima, Ökosysteme und Ressourcen*. Norderstedt : Books on Demand, 2004
- [19] Bossel, H. : *Systeme, Dynamik, Simulation: Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme*. Norderstedt : Books on Demand, 2004
- [20] Bossel, H. : *Systemzoo*. Bd. 3: *Wirtschaft, Gesellschaft und Entwicklung*. Norderstedt : Books on Demand, 2004
- [21] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Verordnung zur Erhebung, zum Nachweis der ordnungsgemäßen Entrichtung und zur Erstattung der Maut (LKW-Maut-Verordnung – LKW-MautV) vom 24. Juni 2003. In: *Bundesgesetzblatt* 28 (2003), S. 1003–1005
- [22] Bundesverband Güterkraftverkehr, Logistik und Entsorgung e.V. (BGL): *Kostenentwicklung im Güterkraftverkehr. Nationaler Nahverkehr 2010-2016*. Online. http://www.bgl-ev.de/web/der_bgl/informationen/branchenkostenentwicklung.htm?v=2#form. Version:2016. – Abgerufen am 09.11.2016
- [23] Cerwenka, P. : *Kompendium der Verkehrssystemplanung*. Wien : Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, 2000
- [24] Cetin, N. : *Large-scale parallel graph-based simulations*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, Diss., 2005
- [25] Charypar, D. : *Efficient algorithms for the microsimulation of travel behavior in very large scenarios*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, Diss., 2008
- [26] Charypar, D. ; Balmer, M. ; Axhausen, K. W.: High-performance traffic flow microsimulation for large problems. In: *88th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington, D.C., January 2009
- [27] Charypar, D. ; Nagel, K. : Generating complete all-day activity plans with genetic algorithms. In: *Transportation* 32 (2005), Nr. 4, S. 369–397
- [28] Chow, J. Y. J. ; Yang, C. H. ; Regan, A. C.: State-of-the art of freight forecast modeling: lessons learned and the road ahead. In: *Transportation* 37 (2010), Nr. 6, S. 1011–1030
- [29] Coyle, G. : The practice of system dynamics: milestones, lessons and ideas from 30 years experience. In: *System Dynamics Review* 14 (1998), Nr. 4, S. 343–365
- [30] Dangerfield, B. : Optimisation of system dynamics models. In: *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. New York : Springer-Verlag, 2009
- [31] Dell'Amico, M. ; Monaci, M. ; Pagani, C. ; Vigo, D. : Heuristic approaches for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. In: *Transportation Science* 41 (2007), Nr. 4, S. 516–526
- [32] Deutsche Automobil Treuhand GmbH (DAT Group): *Gebrauchtfahrzeugwerte*. Online. <https://www.dat.de/gebrauchtfahrzeugwerte.html#/start>. Version:2017. – Abgerufen am 12.07.2017
- [33] Deutsche Post AG: *Delivering Tomorrow, Zukunftstrend Nachhaltige Logistik*. Online. http://www.dpdhl.com/content/dam/dpdhl/logistik_populaer/trends/StudieSustainableLogistics/dpdhl_delivering_tomorrow_studie.pdf. Version:2010. – Abgerufen am 12.07.2017
- [34] Deutsche Post DHL Group: *Einkaufen 4.0. Der Einfluss von E-Commerce auf Lebensqualität und Einkaufsverhalten*. Online. http://www.dpdhl.com/content/dam/dpdhl/presse/pdfs_zu_pressemitteilungen/2011_11/dpdhl-studie-einkaufen-4-0.pdf. Version:2012. – Abgerufen am 09.11.2016

- [35] Deutsche Post DHL Group: *Packstationen*. Online. www.dpdhl.com/de/presse/pressemitteilungen/. Version: 2017. – Abgerufen am 09.11.2016
- [36] DPD iloxx Service GmbH: *Depots, Paket-Shops und Filialen, Packstationen und Paketboxen*. Online. <https://www.versandtarif.de/versandtools/suche/paketshop.aspx>. Version: 2016. – Abgerufen am 09.11.2016
- [37] Eiben, A. E. ; Smith, J. E.: *Introduction to evolutionary computing*. Bd. 53. Heidelberg : Springer-Verlag Heidelberg, 2003
- [38] Emberger, G. : *Interdisziplinäre Betrachtung der Auswirkungen verkehrlicher Maßnahmen auf sozio-ökonomische Systeme*, Universität Wien, Sozial- und Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Institut für Soziologie, Diss., 1999
- [39] Engel, K. : *Demografische Determinanten der Energienachfrage der Haushalte in Deutschland*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Philosophische Fakultät, Fachbereich Theologie, Diss., 2010
- [40] Esser, K. ; Kurte, J. : *Kurier-, Express- und Paketdienste. Innovative Partner für Wirtschaft und Gesellschaft. KEP-Studie 2015 – Analyse des Marktes in Deutschland. Eine Untersuchung im Auftrag des Bundesverbandes Paket- und Expresslogistik e.V. (BIEK)*. Köln, 2015
- [41] Esser, K. ; Kurte, J. : *Kurier-, Express- und Paketdienste. Wachstumsmarkt und Beschäftigungsmotor. KEP-Studie 2016 – Analyse des Marktes in Deutschland. Eine Untersuchung im Auftrag des Bundesverbandes Paket- und Expresslogistik e.V. (BIEK)*. Köln, 2016
- [42] Europäisches Parlament ; Europäischer Rat: VERORDNUNG (EG) Nr. 715/2007 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 20. Juni 2007 über die Typp Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (2007), S. L 171/1–L 171/16
- [43] EuroTransportMedia Verlags- und Veranstaltungs-GmbH (ETM): Transportkosten für Transporter bis 3,5 t. In: *Der lastauto omnibus KATALOG* (2016), Nr. 45, S. 289
- [44] Feil, M. : *Choosing the daily schedule: Expanding activity-based travel demand modelling*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, Diss., 2010
- [45] Figiel Interactive: *Paketshops in Berlin*. Online. <https://www.paket.net/dhl/paketshop/berlin/>. Version: 2016. – Abgerufen am 09.11.2016
- [46] Flämig, H. ; Hertel, C. : Clusterförderung als Weg aus dem zunehmenden Güterverkehr. In: *Ökologisches Wirtschaften* 22 (2007), Nr. 2
- [47] Flämig, H. ; Hertel, C. ; Jäger, B. : *Wirtschaftsverkehr in Ballungsräumen*. Bremerhaven : Wirtschaftsverlag NW, Verlag für Neue Wissenschaften, 2006
- [48] Forrester, J. W.: System dynamics, systems thinking, and soft OR. In: *System Dynamics Review* 10 (1994), Nr. 2-3, S. 245–256
- [49] Forrester, J. W.: Industrial dynamics, a major breakthrough for decision makers. In: *Harvard business review* 36 (1958), Nr. 4, S. 37–66
- [50] Forrester, J. W.: *Industrial dynamics*. Portland, Oregon : Productivity Press, 1961
- [51] Forrester, J. W.: *Urban dynamics*. Bd. 114. Cambridge : MIT Press, 1969
- [52] Forrester, J. W.: *World dynamics*. Bd. 59. Cambridge : Wright-Allen Press, 1971
- [53] Forrester, J. W.: *Grundzüge einer Systemtheorie*. Wiesbaden : Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, 1972
- [54] FOSSGIS e.V.: *Karte Berlin*. Online. <http://www.openstreetmap.org/relation/62422#map=10/52.5072/13.4248>. Version: 2016. – Abgerufen am 09.11.2016

- [55] Frey, W. ; Liedtke, G. ; Friedrich, H. ; Thaller, C. ; Dahmen, B. ; Wolfermann, A. ; Janßen, T. ; Hahn, W. : Empfehlungen zur Modellierung des Wirtschaftsverkehrs. In: *Straßenverkehrstechnik* 10 (2016), S. 678–687
- [56] Friedrich, H. : *Simulation of logistics in food retailing for freight transportation analysis*, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung (IWW), Diss., 2010
- [57] Gabler, M. : *Analyse und agentenbasierte Modellierung des städtischen Distributionsverkehrs im Lebensmitteleinzelhandel*, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung (IWW), Lehrstuhl für Netzwerkökonomie, Diplomarbeit, 2012
- [58] Gabler, M. ; Schröder, S. ; Friedrich, H. ; Liedtke, G. : Generierung der Nachfragestrukturen für die mikroskopische Simulation des städtischen Distributionsverkehrs im Lebensmittelhandel. In: *Wirtschaftsverkehr 2013*. Berlin/Heidelberg : Springer Vieweg, 2013, S. 32–48
- [59] Gacogne, V. : *Impact des coûts de transport sur les systèmes logistiques par une modélisation en dynamique des systèmes: le modèle SANDOMA*, École nationale des ponts et chaussées, Diss., 2003
- [60] Gendreau, M. ; Laporte, G. ; Musaraganyi, C. ; Taillard, É. D. : A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. In: *Computers and Operations Research* 26 (1999), Nr. 12, S. 1153–1173
- [61] Gerike, R. : *Verkehrsplanung: Einführung und Grundbegriffe*. Online. https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/ressourcen/dateien/vip/lehre/ws/Verkehrspl_ws1516/BIW2_07_Grundlagen.pdf?lang=de. Version:2016. – Abgerufen am 21.06.2017
- [62] Grether, D. ; Chen, Y. ; Rieser, M. ; Nagel, K. : Effects of a simple mode choice model in a large-scale agent-based transport simulation. In: *Complexity and Spatial Networks*. Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag, 2009, S. 167–186
- [63] Gringmuth, C. ; Liedtke, G. ; Geweke, S. ; Rothengatter, W. : Impacts of intelligent information systems on transport and the economy — the micro-based modelling system OVID. In: *ITS 16th European Regional Conference*. Porto, Portugal, 2005
- [64] Halim, R. A. ; Tavasszy, L. A. ; Seck, M. D. : Modeling the global freight transportation system: A multi-level modeling perspective. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference (WSC) 2012*. Berlin : IEEE, 2012
- [65] Han, J. ; Hayashi, Y. : A system dynamics model of CO₂ mitigation in China's inter-city passenger transport. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 13 (2008), Nr. 5, S. 298–305
- [66] Heimgartner, C. : *Systemdynamische Simulation von Verkehr und Flächennutzungen: Evaluation nachhaltigkeitsfördernder Massnahmen*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, Diss., 2005
- [67] Horni, A. ; Scott, D. ; Balmer, M. ; Axhausen, K. : Location choice modeling for shopping and leisure activities with MATSim: combining microsimulation and time geography. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2009), Nr. 2135, S. 87–95
- [68] Horni, A. ; Axhausen, K. W.: MATSim Agent Heterogeneity and a One-Week Scenario / Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme. 2012. – Forschungsbericht
- [69] Horni, A. ; Nagel, K. ; Axhausen, K. W.: Introducing MATSim. In: *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. London : Ubiquity Press, 2016, S. 3–8
- [70] Hyndman, R. J. ; Athanasopoulos, G. : *Forecasting: principles and practice*. Online. <https://www.otexts.org/fpp/2/5>. Version:2013. – Abgerufen am 12.06.2017
- [71] Infras AG: *Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs Version 3.1*. Bern, Schweiz, 2010

- [72] Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung (IWW): ASTRA — Assessment of Transport Strategies. Final Report / Karlsruher Institut für Technologie. 2000. – Forschungsbericht
- [73] Jifeng, W. ; Huapu, L. U. ; Hu, P. : System dynamics model of urban transportation system and its application. In: *Journal of Transportation Systems engineering and information technology* 8 (2008), Nr. 3, S. 83–89
- [74] Jin, W. ; Xu, L. ; Yang, Z. : Modeling a policy making framework for urban sustainability: Incorporating system dynamics into the Ecological Footprint. In: *Ecological Economics* 68 (2009), Nr. 12, S. 2938–2949
- [75] Jong, G. de ; Gunn, H. ; Walker, W. : National and international freight transport models: an overview and ideas for future development. In: *Transport Reviews* 24 (2004), Nr. 1, S. 103–124
- [76] Joubert, J. W. ; Fourie, P. J. ; Axhausen, K. W.: Large-scale combined private car and commercial vehicle agent-based traffic simulation. In: *Transportation Research Record* 2168 (2010), S. 24–32
- [77] Kaczmarek, M. ; Völker, M. : Entwicklung von Simulationsmodellen für die Analyse von Supply-Chain-Strategien und -Strukturen im ProC-B-Paradigma. Technical Report 03020 / Technische Universität Dortmund. 2004. – Forschungsbericht
- [78] Kapmeier, F. : *Vom systemischen Denken zur Methode System Dynamics*, Universität Stuttgart, Abteilung IV, Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und Betriebswirtschaftliche Planung, Diplomarbeit, 1999
- [79] Karnopp, D. C. ; Margolis, D. L. ; Rosenberg, R. C.: *System dynamics: modeling, simulation, and control of mechatronic systems*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, 2012
- [80] Kauperts Berlin: *Paketshops Berlin*. Online. <https://berlin.kauperts.de/portal/dhl-paketshop>. Version:2016. – Abgerufen am 09.11.2016
- [81] Kille, C. : KEP-Märkte und Dienste. In: *Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse*. Heidelberg : Springer Gabler, 2012, S. 263–267
- [82] Kille, C. ; Klaus, P. : Logistik in Deutschland. In: *Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse*. Heidelberg : Springer Gabler, 2012, S. 351–357
- [83] Kille, C. ; Schwemmer, M. : *Die Top 100 der Logistik 2012/2013 – Marktgrößen, Marktsegmente und Marktführer*. Hamburg : DVV Media Group, 2012
- [84] Kirchhoff, P. : *Städtische Verkehrsplanung: Konzepte, Verfahren, Maßnahmen*. Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2002
- [85] Klaus, P. ; Krieger, W. ; Krupp, M. : *Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse*. Wiesbaden : Springer Gabler, 2012
- [86] Kraft, M. ; Szimba, E. ; Krail, M. : A liaison between a System Dynamics Model and a network-based transport model – Advantages for holistic project assessment and challenges. In: *12th World Conference on Transport Research*. Lisbon, Portugal, 2010
- [87] Krail, M. : *System-Based Analysis of Income Distribution Impacts on Mobility Behaviour*. Baden-Baden : Nomos Verlag, 2009
- [88] Krail, M. ; Kühn, A. : The Potential of Alternative Fuel Technologies and of Efficiency Technologies for Heavy Goods Vehicle. In: *Proceedings of the 12th International Symposium on Heavy Vehicle Transportation Technology*. Stockholm, Sweden, 2012
- [89] Kranke, A. : CO₂-Berechnung. Das Sonderheft zur Ermittlung von Treibhausgas-Emissionen in der Logistik. In: *Verkehrsrundschau* (2014), Nr. 10
- [90] Kranke, A. ; Schmied, M. ; Schön, A. D.: *CO₂-Berechnung in der Logistik*. München : Verlag Heinrich Vogel, 2011
- [91] Kuchenbecker, K. : *Strategische Prognose und Bewertung von Verkehrsentwicklungen mit System Dynamics*, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung (IWW), Diss., 2000

- [92] Kühn, A. ; Krail, M. : Dynamic demand modeling of freight fleets. In: *Proceedings of the 31st International Conference of the System Dynamics Society*. Cambridge, Massachusetts, USA, 2013
- [93] Lee, S. Y.: An integrated model of land use/transportation system performance: System dynamics modeling approach. In: *Transportation Research Part A* 1 (1997), Nr. 31, S. 79
- [94] Leerkamp, B. ; Dahmen, B. ; Janßen, T. ; Vollmer, R. : Datenanforderungen an die Weiterentwicklung kleinräumiger Verkehrsnachfragemodelle des Wirtschaftsverkehrs. Praxisleitfaden zu den Datengrundlagen der kleinräumigen Wirtschaftsverkehrsmodellierung. Forschungsprojekt FE 70.0851/10 / Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Wuppertal/Aachen, 2013. – Forschungsbericht
- [95] Lefebvre, N. ; Balmer, M. : Fast shortest path computation in time-dependent traffic networks. In: *The 7th Swiss Transport Research Conference (STRC)*. Monte Verità, Switzerland, 2007
- [96] Lefebvre, N. ; Balmer, M. : Fast shortest path computation in time-dependent traffic networks / Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme. 2007. – Forschungsbericht
- [97] Leihs, D. ; Siegl, T. ; Hartmann, M. : *City-Maut — Nutzen und Technologien von Systemen zum Steuern der Zufahrt in Zonen*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014
- [98] Liedtke, G. : *An actor based approach to commodity transport modelling*. Baden-Baden : Nomos Verlag, 2006
- [99] Machledt-Michael, S. : *Fahrtenkettenmodell für den städtischen und regionalen Wirtschaftsverkehr*. Aachen : Shaker Verlag, 2000
- [100] Manner-Romberg, H. ; Kille, C. ; Müller-Steinfahrt, U. : Marktuntersuchung und Entwicklung von Kurier-, Express- und Paketdienstleistungen 2015 / MRU GmbH. Hamburg, Würzburg, 2015. – Gutachten
- [101] Meadows, D. L. ; Behrens, W. W. ; Meadows, D. H. ; Naill, R. F. ; Randers, J. ; Zahn, E. : *Dynamics of growth in a finite world*. Cambridge : Wright-Allen Press, 1974
- [102] Meadows, D. H. ; Meadows, D. L. ; Randers, J. ; Behrens, W. W.: *The limits to growth*. Chelsea : Westview Press, 1972
- [103] Mehlhart, G. ; Merz, C. ; Akkermans, L. ; Jordal-Joergensen, J. : European second-hand car market analysis. Final Report / Öko-Institut. Darmstadt, Germany, 2011. – Forschungsbericht
- [104] Meimbresse, B. ; Haupt, T. ; Bieling, N. : WIVER — Ein Berechnungsmodell für den städtischen und regionalen Wirtschaftsverkehr. In: *HEUREKA 1996 — Optimierung in Verkehr und Transport*. Karlsruhe, 1996
- [105] Meister, K. ; Rieser, M. ; Ciari, F. ; Horni, A. ; Balmer, M. ; Axhausen, K. W.: *Anwendung eines agentenbasierten Modells der Verkehrsnachfrage auf die Schweiz*. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, 2007
- [106] Mest, L. : *Typologische Ordnung von Logistikstrategien und -strukturen und ihre Integration in die Nachfragemodellierung des Güterwirtschaftsverkehrs*, Technische Universität Dortmund, Fakultät Maschinenbau, Institut für Transportlogistik, Diss., 2011
- [107] Meyer Sanches, L. ; Pinto, J. A. ; Fontes Lima Júnior, O. : Freight Vehicle Circulation Restriction Policy in an Emerging Country Metropolitan Area: undesired impacts. In: *Proceedings of the 31st International Conference of the System Dynamics Society*. Cambridge, Massachusetts, USA, 2013
- [108] Mineralölwirtschaftsverband e.V. (MWV): *Jährliche Verbraucherpreise für Mineralölprodukte 1950-2015*. Online. <https://www.mwv.de/verbraucherpreise/?loc=8>. Version:2016. – Abgerufen am 09.11.2016
- [109] Moder, N. : *Standard-Vorgehensweise zur Analyse und Optimierung der Distributionslogistik im Bereich Business to Consumer*, Technische Universität Ilmenau, Fakultät Maschinenbau, Diss., 2010
- [110] Nagel, K. ; Kickhöfer, B. ; Joubert, J. W.: Heterogeneous tolls and values of time in multi-agent transport simulation. In: *Procedia Computer Science* 32 (2014), S. 762–768

- [111] Olson, P. ; Nolan, K. : *In Depth: Europe's Most Congested Cities*. Online. http://www.forbes.com/2008/04/21/europe-commute-congestion-forbeslife-cx_po_0421congestion_slide.html. Version:2008. – Abgerufen am 10.11.2016
- [112] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): *OECD-Umweltausblick bis 2050 — Die Konsequenzen des Nichthandelns. Zusammenfassung*. Online. <https://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/49889636.pdf>. Version:2012. – Abgerufen am 09.11.2016
- [113] Ortúzar, J. ; Willumsen, L. : *Modelling Transport*. West Sussex, England : John Wiley & Sons, 2002
- [114] Paketda: *Alle Paketzentren in Deutschland*. Online. <http://www.paketda.de/paketdepot-alle.html>. Version:2016. – Abgerufen am 09.11.2016
- [115] Papula, L. : *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 2*. 14. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015
- [116] Persson, J. ; Davidsson, P. : *Transport Modelling – Overview and Best Practice*. Karlshamm : East West TC, 2007
- [117] Pfaffenbichler, P. : *The strategic, dynamic and integrated urban land use and transport model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator)*, Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Diss., 2003
- [118] Pflieger, V. : *Bestimmtheitsmaß R^2* . Online. https://www.inwt-statistics.de/blog-artikel-lesen/Bestimmtheitsmass_R2-Teil2.html. Version:2014. – Abgerufen am 12.06.2017
- [119] Popovici, E. ; Bucci, A. ; Wiegand, R. P. ; De Jong, E. D.: Coevolutionary principles. In: *Handbook of Natural Computing*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2012, S. 987–1033
- [120] Powell, M. J. D.: An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. In: *Computer Journal* 7 (1964), Nr. 2, S. 155–162
- [121] Raux, C. : A systems dynamics model for the urban travel system. In: *Proceedings of the European Transport Conference*. London, United Kingdom, 2003
- [122] Raux, C. ; Sdika, M. ; Hermemier, V. : Simulation de la dynamique du système de déplacements urbains: une plate-forme de modélisation. Rapport final / Laboratoire Aménagement Economie Transports. 2007. – Forschungsbericht
- [123] Reinhardt Internet Media GbR: *Paket-Shops und Filialen in Berlin*. Online. <https://www.offen.net/berlin/filialen/gls-paketshop-QGIW.html>. Version:2016. – Abgerufen am 09.11.2016
- [124] Rieser, M. : *Implementierung der City-Maut in Berlin für MATSim*. Online. http://www.matsim.org/files/dtd/roadpricing_v1.dtd. Version:2017. – Abgerufen am 25.04.2017
- [125] Rieser, M. : *Infrastrukturnetzwerk von Berlin für MATSim*. Online. http://www.matsim.org/files/dtd/network_v1.dtd. Version:2017. – Abgerufen am 25.04.2017
- [126] Rieser, M. ; Nagel, K. ; Horni, A. : Generation of the Initial MATSim Input. In: *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. London : Ubiquity Press, 2016, S. 61–64
- [127] Rothengatter, W. ; Liedtke, G. : Agentenbasierte Simulation der Güterverkehrsmärkte. In: *3. Wissenschaftssymposium Logistik, Dortmund, 2006*
- [128] Russell, S. ; Norvig, P. : *Artificial Intelligence — A Modern Approach*. Upper Saddle River, New Jersey : Pearson Education, 2010
- [129] Ruutu, S. ; Auvinen, H. ; Tuominen, A. ; Ahlqvist, T. ; Oksanen, J. : Simulation of Transitions Towards Emission-Free Urban Transport. In: *Proceedings of the 31st International Conference of the System Dynamics Society*. Cambridge, Massachusetts, USA, 2013
- [130] Salini, P. ; Karsk, M. : SimTrans — Freight Transportation Simulation Model. In: *Proceedings of the 20th System Dynamics Conference*. Palermo, Italy, 2002

- [131] Schade, B. ; Rothengatter, W. ; Schade, W. : Ecological and Economic Modelling with a Model for Economic assessment of Sustainability policies Of Transport (ESCOT). In: *Proceedings of the 3rd Biennial Conference of the European Society of Ecological Economics*. Vienna, Austria, 2000
- [132] Schade, W. : Assessing direct or indirect benefits of transport? Comparing benefits of transport policies within the transport market versus within other markets with the ASTRA model. In: *Proceedings of the 10th World Conference on Transport Research*. Istanbul, Turkey, 2004
- [133] Scharlau, W. : *Mathematik für Naturwissenschaftler*. Bd. 3. Münster : LIT Verlag, 2005
- [134] Schrimpf, G. ; Schneider, J. ; Stamm-Wilbrandt, H. ; Dueck, G. : Record breaking optimization results using the ruin and recreate principle. In: *Journal of Computational Physics* 159 (2000), Nr. 2, S. 139–171
- [135] Schröder, S. ; Dabidian, P. ; Liedtke, G. : A conceptual proposal for an expert system to analyze smart policy options for urban CEP transports. In: *Smart Cities Symposium Prague (SCSP)*. Prague, Czech Republic, 2015
- [136] Schröder, S. ; Liedtke, G. : Modeling and Analyzing the Effects of Differentiated Urban Freight Measures — A Case Study of the Food Retailing Industry. In: *Transportation Research Board*. Washington DC, 2014
- [137] Schröder, S. ; Liedtke, G. : Towards an integrated multi-agent urban transport model of passenger and freight. In: *Proceedings of URBE 2015, Conference on URban freight and BEhavior change*. Rome, Italy, 2015
- [138] Schröder, S. ; Zilske, M. ; Liedtke, G. ; Nagel, K. : Der Transportlogistikdienstleister in einem Multiagentenmodell des Güterverkehrs. In: *Wirtschaftsverkehr*, 2011, S. 77–95
- [139] Schröder, S. ; Zilske, M. ; Liedtke, G. ; Nagel, K. : A computational framework for a multi-agent simulation of freight transport activities. In: *Transport Research Board*. Washington DC, 2012
- [140] Schröder, S. ; Zilske, M. ; Liedtke, G. ; Nagel, K. : Towards a multi-agent logistics and commercial transport model: The transport service provider's view. In: *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 39 (2012), S. 649–663
- [141] Schulz, H. : *Arbeitstage und Werktage zwischen dem 1.1.2009 und dem 31.12.2100 für Berlin*. Online. <https://www.schnelle-online.info/Tage-bis-zur-Rente-berechnen.html?from=01.01.2009&to=31.12.2100#ergebnis>. Version:2017. – Abgerufen am 12.07.2017
- [142] Schwemmer, M. : *Die Top 100 der Logistik 2016/2017 – Marktgrößen, Marktsegmente und Marktführer*. Hamburg : DVV Media Group, 2016
- [143] Schwerdtfeger, W. : *Städtischer Lieferverkehr: Bestimmungsgründe, Umfang und Ablauf des Lieferverkehrs von Einzelhandels- und Dienstleistungsbetrieben*. Bd. 20. Institut für Stadtbauwesen, 1976
- [144] Senge, P. M. ; Forrester, J. W. : Tests for building confidence in system dynamics models. In: *System dynamics, TIMS studies in management sciences* 14 (1980), S. 209–228
- [145] Shah, M. S. : Activity-based travel demand modelling including freight and cross-border traffic with transit simulation / Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme. 2010. – Forschungsbericht
- [146] Shepherd, S. ; Bonsall, P. ; Harrison, G. : Factors affecting future demand for electric vehicles: A model based study. In: *Transport Policy* 20 (2012), S. 62–74
- [147] Sonntag, H. : Grüne Logistik – Belastungen und Chancen für die Wirtschaft. In: *Verkehr der Zukunft – Mobilität gestalten, Klima schützen, Wirtschaft stärken*. München, 2012
- [148] Sonntag, H. ; Meimbresse, B. : Development of organisational options for goods transports in urban areas. In: *International Conference on Commercial/Goods Transport in Urban Areas*. Berlin, Germany, 2012
- [149] Sonntag, H. ; Meimbresse, B. ; Castendiek, U. : Entwicklung eines Wirtschaftsverkehrsmodells für Städte. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Reihe Verkehrstechnik* 33 (1996)

- [150] Statistisches Bundesamt: *Gliederung der Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008)*. Online. https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/GueterWirtschaftsklassifikationen/klassifikationenwz2008.pdf?__blob=publicationFile. Version: August 2007. – Abgerufen am 24.05.2017
- [151] Steinmeyer, I.: Definition und Bedeutung des Personenwirtschaftsverkehrs. In: *Ein Sachstandsbericht aus dem Jahr 2006* (2006)
- [152] Sterman, J. D.: Appropriate summary statistics for evaluating the historical fit of system dynamics models. In: *Dynamica* 10 (1984), Nr. 2, S. 51–66
- [153] Sterman, J. D.: System dynamics modeling: tools for learning in a complex world. In: *California management review* 43 (2001), Nr. 4, S. 8–25
- [154] Stölzle, W.; Fagagnini, H. P.: *Güterverkehr kompakt*. München: Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH, 2010
- [155] Struben, J.; Sterman, J. D.: Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems. In: *Environment and Planning B: Planning and Design* 35 (2008), Nr. 6, S. 1070–1097
- [156] SVG Straßenverkehrs-Genossenschaft Sachsen und Thüringen eG: *Die Entwicklung der Mautsätze in Deutschland*. Online. <https://www.svg-dresden.de/files/Inhalte/Maut/Deutschland/Entwicklung%20der%20Mauts%C3%A4tze.pdf>. Version: 2017. – Abgerufen am 25.04.2017
- [157] Taniguchi, E.; Van Der Heijden, R. E.: An evaluation methodology for city logistics. In: *Transport Reviews* 20 (2000), Nr. 1, S. 65–90
- [158] Tavasszy, L. A.; Bliemer, M. C. J.: Transport flow, distribution and allocation models, traffic assignment and forecasting. In: *The Sage handbook of transport studies*. Los Angeles/London/New Delhi/Singapore/Washington DC: Sage Publications Ltd, 2013, S. 331–346
- [159] Thaller, C.: *Wirtschaftsverkehrsmodellierung*. In: *Verkehrs- und Transportlogistik*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2013, S. 378–400
- [160] Thaller, C.; Clausen, U.: System Dynamics based microscopic freight transport simulation for urban areas — CEP market analyses. In: *Proceedings of the 44th European Transport Conference*. Barcelona, Spain, 2016
- [161] Thaller, C.; Clausen, U.; Kampmann, R.: System Dynamics Based, Microscopic Freight Transport Simulation for Urban Areas. In: *Commercial Transport*. Cham/Heidelberg/New York/Dordrecht/London: Springer International Publishing, 2016, S. 55–72
- [162] Thaller, C.; Dahmen, B.; Liedtke, G.; Friedrich, H.: Freight Transport Demand Modelling. In: *Commercial Transport*. Cham/Heidelberg/New York/Dordrecht/London: Springer International Publishing, 2016, S. 39–54
- [163] Thaller, C.; Niemann, F.; Dahmen, B.; Clausen, U.; Leerkamp, B.: A System Dynamics Approach for Assessing the Development of the CEP market in Urban Areas. In: *Proceedings of the 34th International Conference of the System Dynamics Society*. Delft, Netherlands, 2016
- [164] Thaller, C.; Niemann, F.; Dahmen, B.; Clausen, U.; Leerkamp, B.: Describing and explaining urban freight transport by System Dynamics. In: *Transportation Research Procedia* 25 (2017), S. 1075–1094
- [165] Train, K. E.: *Discrete choice methods with simulation*. New York: Cambridge University Press, 2003
- [166] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): *VDI-Richtlinie 4400, Blatt 3. Logistikkennzahlen für die Distribution*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2002
- [167] Vierhaus, I.; Fügenschuh, A.; Lion Gottwald, R.; Grösser, S. N.: Modern Nonlinear Optimization Techniques for an Optimal Control of System Dynamics Models. ZIP-Report 14-08 / Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik. 2014. – Forschungsbericht
- [168] Villa, S.; Gonçalves, P.; Arango, S.: Exploring retailers' ordering decisions under delays. In: *System Dynamics Review* 31 (2015), Nr. 1-2, S. 1–27
- [169] Wehrmut, M.; Wirth, R.: Modelle und Strategien des Güterverkehrs. In: *Stadtverkehrsplanung. Grundlagen, Methoden, Ziele*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005

- [170] Weidmann, U. ; Stölzle, W. ; Bopp, B. ; Hofmann, E. : Nachhaltige Güterfeinverteilung: Ein systematischer Ansatz. In: *Internationales Verkehrswesen* 64 (2012), Nr. 2, S. 28–33
- [171] Wiener, N. : *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine*. Paris : Hermann-Verlag, 1948
- [172] Wittenbrink, P. : *Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr. Grundlagen, Optimierungspotenzial, Green Logistics*. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2011
- [173] Wittenbrink, P. : *Transportmanagement: Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe*. Wiesbaden : Springer Gabler, 2014
- [174] Yao, H. ; Shen, L. ; Tan, Y. ; Hao, J. : Simulating the impacts of policy scenarios on the sustainability performance of infrastructure projects. In: *Automation in Construction* 20 (2011), Nr. 8, S. 1060–1069
- [175] Zhan, S. F. ; Zhang, X. C. ; Ma, C. ; Chen, W. P.: Dynamic modelling for ecological and economic sustainability in a rapid urbanizing region. In: *Procedia Environmental Sciences* 13 (2012), S. 242–251
- [176] Zilske, M. ; Schröder, S. ; Nagel, K. ; Liedtke, G. : Adding freight traffic to matsim. VSP Working Paper 12-02 / TU Berlin, Transport Systems Planning and Transport Telematics. 2012. – Forschungsbericht

Anhang

A. Parametrisierungsergebnisse

Tabelle A.1.: Modellparameter des Submoduls Bevölkerung.

Beschreibung	P	T	IW	U	Q
Fertilität 10–13	$\rho_{g,2}$	K	0,000007	%/a	[2]
Fertilität 14–19	$\rho_{g,3}$	K	0,005636	%/a	[2]
Fertilität 20–24	$\rho_{g,4}$	K	0,020705	%/a	[2]
Fertilität 25–29	$\rho_{g,5}$	K	0,034361	%/a	[2]
Fertilität 30–34	$\rho_{g,6}$	K	0,041407	%/a	[2]
Fertilität 35–39	$\rho_{g,7}$	K	0,025783	%/a	[2]
Fertilität 40–44	$\rho_{g,8}$	K	0,005616	%/a	[2]
Fertilität 45–49	$\rho_{g,9}$	K	0,000281	%/a	[2]
Fertilität 50–54	$\rho_{g,10}$	K	0,000020	%/a	[2]
Fertilität 55–59	$\rho_{g,11}$	K	0,000007	%/a	[2]
Mortalitätsrate 0–9	$\rho_{M,1}$	K	0,000484	%/a	[2]
Mortalitätsrate 10–13	$\rho_{M,2}$	K	0,000090	%/a	[2]
Mortalitätsrate 14–19	$\rho_{M,3}$	K	0,000202	%/a	[2]
Mortalitätsrate 20–24	$\rho_{M,4}$	K	0,000342	%/a	[2]
Mortalitätsrate 25–29	$\rho_{M,5}$	K	0,000391	%/a	[2]
Mortalitätsrate 30–34	$\rho_{M,6}$	K	0,000518	%/a	[2]
Mortalitätsrate 35–39	$\rho_{M,7}$	K	0,000812	%/a	[2]
Mortalitätsrate 40–44	$\rho_{M,8}$	K	0,001400	%/a	[2]
Mortalitätsrate 45–49	$\rho_{M,9}$	K	0,002484	%/a	[2]
Mortalitätsrate 50–54	$\rho_{M,10}$	K	0,004313	%/a	[2]
Mortalitätsrate 55–59	$\rho_{M,11}$	K	0,006644	%/a	[2]
Mortalitätsrate 60–64	$\rho_{M,12}$	K	0,010001	%/a	[2]
Mortalitätsrate 65–69	$\rho_{M,13}$	K	0,014696	%/a	[2]
Mortalitätsrate 70–74	$\rho_{M,14}$	K	0,022405	%/a	[2]
Mortalitätsrate 75–79	$\rho_{M,15}$	K	0,036562	%/a	[2]
Mortalitätsrate 80–84	$\rho_{M,16}$	K	0,063202	%/a	[2]
Mortalitätsrate 85–89	$\rho_{M,17}$	K	0,109678	%/a	[2]
Mortalitätsrate 90–94	$\rho_{M,18}$	K	0,187066	%/a	[2]
Mortalitätsrate ≥ 95	$\rho_{M,19}$	K	0,245909	%/a	[2]
Immigrationsrate 0–9	$\rho_{I,1}$	K	0,034198	%/a	[2]
Immigrationsrate 10–13	$\rho_{I,2}$	K	0,026761	%/a	[2]
Immigrationsrate 14–19	$\rho_{I,3}$	K	0,052529	%/a	[2]
Immigrationsrate 20–24	$\rho_{I,4}$	K	0,154895	%/a	[2]
Immigrationsrate 25–29	$\rho_{I,5}$	K	0,122644	%/a	[2]
Immigrationsrate 30–34	$\rho_{I,6}$	K	0,078231	%/a	[2]

A. Parametrisierungsergebnisse

Fortsetzung von Tabelle A.1

Beschreibung	P	T	IW	U	Q
Immigrationsrate 35–39	$\rho_{I,7}$	K	0,048988	%/a	[2]
Immigrationsrate 40–44	$\rho_{I,8}$	K	0,031473	%/a	[2]
Immigrationsrate 45–49	$\rho_{I,9}$	K	0,023574	%/a	[2]
Immigrationsrate 50–54	$\rho_{I,10}$	K	0,019551	%/a	[2]
Immigrationsrate 55–59	$\rho_{I,11}$	K	0,014170	%/a	[2]
Immigrationsrate 60–64	$\rho_{I,12}$	K	0,010918	%/a	[2]
Immigrationsrate 65–69	$\rho_{I,13}$	K	0,008688	%/a	[2]
Immigrationsrate 70–74	$\rho_{I,14}$	K	0,006499	%/a	[2]
Immigrationsrate 75–79	$\rho_{I,15}$	K	0,006330	%/a	[2]
Immigrationsrate 80–84	$\rho_{I,16}$	K	0,008134	%/a	[2]
Immigrationsrate 85–89	$\rho_{I,17}$	K	0,010791	%/a	[2]
Immigrationsrate 90–94	$\rho_{I,18}$	K	0,011677	%/a	[2]
Immigrationsrate ≥ 95	$\rho_{I,19}$	K	0,007754	%/a	[2]
Emigrationsrate 0–9	$\rho_{E,1}$	K	0,035583	%/a	[2]
Emigrationsrate 10–13	$\rho_{E,2}$	K	0,023968	%/a	[2]
Emigrationsrate 14–19	$\rho_{E,3}$	K	0,028781	%/a	[2]
Emigrationsrate 20–24	$\rho_{E,4}$	K	0,083524	%/a	[2]
Emigrationsrate 25–29	$\rho_{E,5}$	K	0,084367	%/a	[2]
Emigrationsrate 30–34	$\rho_{E,6}$	K	0,070550	%/a	[2]
Emigrationsrate 35–39	$\rho_{E,7}$	K	0,050875	%/a	[2]
Emigrationsrate 40–44	$\rho_{E,8}$	K	0,034286	%/a	[2]
Emigrationsrate 45–49	$\rho_{E,9}$	K	0,026157	%/a	[2]
Emigrationsrate 50–54	$\rho_{E,10}$	K	0,022283	%/a	[2]
Emigrationsrate 55–59	$\rho_{E,11}$	K	0,017460	%/a	[2]
Emigrationsrate 60–64	$\rho_{E,12}$	K	0,014614	%/a	[2]
Emigrationsrate 65–69	$\rho_{E,13}$	K	0,010855	%/a	[2]
Emigrationsrate 70–74	$\rho_{E,14}$	K	0,007851	%/a	[2]
Emigrationsrate 75–79	$\rho_{E,15}$	K	0,008268	%/a	[2]
Emigrationsrate 80–84	$\rho_{E,16}$	K	0,010822	%/a	[2]
Emigrationsrate 85–89	$\rho_{E,17}$	K	0,015052	%/a	[2]
Emigrationsrate 90–94	$\rho_{E,18}$	K	0,019370	%/a	[2]
Emigrationsrate ≥ 95	$\rho_{E,19}$	K	0,020787	%/a	[2]
Generationen 0–9	N_1	K	10	a	—
Generationen 10–13	N_2	K	4	a	—
Generationen 14–19	N_3	K	6	a	—
Generationen 20–24	N_4	K	5	a	—
Generationen 25–29	N_5	K	5	a	—
Generationen 30–34	N_6	K	5	a	—
Generationen 35–39	N_7	K	5	a	—
Generationen 40–44	N_8	K	5	a	—
Generationen 45–49	N_9	K	5	a	—
Generationen 50–54	N_{10}	K	5	a	—
Generationen 55–59	N_{11}	K	5	a	—
Generationen 60–64	N_{12}	K	5	a	—

Fortsetzung von Tabelle A.1

Beschreibung	P	T	IW	U	Q
Generationen 65–69	N_{13}	K	5	a	—
Generationen 70–74	N_{14}	K	5	a	—
Generationen 75–79	N_{15}	K	5	a	—
Generationen 80–84	N_{16}	K	5	a	—
Generationen 85–89	N_{17}	K	5	a	—
Generationen 90–94	N_{18}	K	5	a	—
Bevölkerung 0–9	B_1	Z	287.290	KI	[2]
Bevölkerung 10–13	B_2	Z	105.146	KI	[2]
Bevölkerung 14–19	B_3	Z	167.968	KI	[2]
Bevölkerung 20–24	B_4	Z	231.857	KI	[2]
Bevölkerung 25–29	B_5	Z	274.795	KI	[2]
Bevölkerung 30–34	B_6	Z	253.967	KI	[2]
Bevölkerung 35–39	B_7	Z	240.344	KI	[2]
Bevölkerung 40–44	B_8	Z	292.081	KI	[2]
Bevölkerung 45–49	B_9	Z	298.933	KI	[2]
Bevölkerung 50–54	B_{10}	Z	235.410	KI	[2]
Bevölkerung 55–59	B_{11}	Z	218.274	KI	[2]
Bevölkerung 60–64	B_{12}	Z	178.010	KI	[2]
Bevölkerung 65–69	B_{13}	Z	220.696	KI	[2]
Bevölkerung 70–74	B_{14}	Z	185.009	KI	[2]
Bevölkerung 75–79	B_{15}	Z	109.297	KI	[2]
Bevölkerung 80–84	B_{16}	Z	75.346	KI	[2]
Bevölkerung 85–89	B_{17}	Z	44.026	KI	[2]
Bevölkerung 90–94	B_{18}	Z	14.297	KI	[2]
Bevölkerung ≥ 95	B_{19}	Z	9.929	KI	[2]

A. Parametrisierungsergebnisse

Tabelle A.2.: Modellparameter des Submoduls Güternachfrage.

Beschreibung	P	T	IW	U	Q
Entwicklungsrate der Güternachfrage pro Privatkunde	$\rho_{GNK,p}$	K	0,077886	%/a	[40, 41, 100]
Entwicklungsrate der Güternachfrage pro Mio. € BIP	$\rho_{GNK,o}$	K	0,009997	%/a	[40, 41, 100]
Güternachfrage pro Privatkunde	GNK_p	Z	8,7746	PE/KI	[40, 41, 100]
Güternachfrage pro Mio. € BIP	GNK_o	Z	529	PE/KI	[40, 41, 100]
Entwicklungsrate BIP	ρ_{BIP}	K	0,038080	%/a	[3]
BIP	BIP	Z	99.267	Mio. € BIP	[3]

Tabelle A.3.: Modellparameter des Submoduls Güterverkehrsnachfrage und -kapazität.

Beschreibung	P	T	IW	U	Q
Auftragsbestand LDL	A	Z	82.720.296	PE	[40, 41, 100]
Anzahl der Geschäftstage	n_{GT}	K	304,78	d/a	[141]
Zeitaufwand für Instandhaltung/Reparatur	t_{IR}	K	3	d/a	[109]

Tabelle A.4.: Modellparameter des Submoduls Laufleistung und Kraftstoffverbrauch.

Beschreibung	P	T	IW	U	Q
Durchschnittliche Nutzungsdauer	t_{ND}	K	5,876	a	[43]
Anteil der EURO 1-LKW	$\alpha_{fb,1}$	K	$G_{\alpha_{fb,1}}$	%	[71]
Anteil der EURO 2-LKW	$\alpha_{fb,2}$	K	$G_{\alpha_{fb,2}}$	%	[71]
Anteil der EURO 3-LKW	$\alpha_{fb,3}$	K	$G_{\alpha_{fb,3}}$	%	[71]
Anteil der EURO 4-LKW	$\alpha_{fb,4}$	K	$G_{\alpha_{fb,4}}$	%	[71]
Anteil der EURO 5-LKW	$\alpha_{fb,5}$	K	$G_{\alpha_{fb,5}}$	%	[71]
Anteil der EURO 6-LKW	$\alpha_{fb,6}$	K	$G_{\alpha_{fb,6}}$	%	[71]
Gewicht pro Sendung	w_S	K	6,317	kg/PE	[83]
Nutzlast pro LKW (max.)	nl_{max}	K	1.450	kg/F	[43]
EURO 1 - Kraftstoffverbrauch LKW voll pro km	$kv_{km,voll,1}$	K	0,141	l/km	[71],[89]
EURO 1 - Kraftstoffverbrauch LKW leer pro km	$kv_{km,leer,1}$	K	0,109	l/km	[71],[89]
EURO 2 - Kraftstoffverbrauch LKW voll pro km	$kv_{km,voll,2}$	K	0,126	l/km	[71],[89]
EURO 2 - Kraftstoffverbrauch LKW leer pro km	$kv_{km,leer,2}$	K	0,098	l/km	[71],[89]
EURO 3 - Kraftstoffverbrauch LKW voll pro km	$kv_{km,voll,3}$	K	0,116	l/km	[89]
EURO 3 - Kraftstoffverbrauch LKW leer pro km	$kv_{km,leer,3}$	K	0,09	l/km	[89]
EURO 4 - Kraftstoffverbrauch LKW voll pro km	$kv_{km,voll,4}$	K	0,116	l/km	[89]
EURO 4 - Kraftstoffverbrauch LKW leer pro km	$kv_{km,leer,4}$	K	0,09	l/km	[89]
EURO 5 - Kraftstoffverbrauch LKW voll pro km	$kv_{km,voll,5}$	K	0,105	l/km	[89]
EURO 5 - Kraftstoffverbrauch LKW leer pro km	$kv_{km,leer,5}$	K	0,09	l/km	[89]
EURO 6 - Kraftstoffverbrauch LKW voll pro km	$kv_{km,voll,6}$	K	0,103	l/km	[89]
EURO 6 - Kraftstoffverbrauch LKW leer pro km	$kv_{km,leer,6}$	K	0,087	l/km	[89]
EURO 5 - Adblueverbrauch pro km	$av_{km,5}$	K	0,03	%	[89]
EURO 6 - Adblueverbrauch pro km	$av_{km,6}$	K	0,06	%	[89]

Tabelle A.5.: Anteile der LKW-Fahrzeugtypen nach Emissionsklassen (Eigene Darstellung nach [71]).

	'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19
$\alpha_{fb,1}$	10,6	8,9	7,4	6,2	5,1	4,2	3,4	2,7	2,1	1,6	1,3
$\alpha_{fb,2}$	22,9	18,9	15,7	13,2	11,2	9,6	8,2	7,0	5,9	4,9	4,0
$\alpha_{fb,3}$	48,2	41,2	35,3	29,4	24,6	20,5	17,4	14,9	12,9	11,1	9,5
$\alpha_{fb,4}$	18,3	31,0	39,9	41,9	37,3	32,2	27,0	22,5	18,7	15,9	13,7
$\alpha_{fb,5}$	0,0	0,0	1,6	9,3	21,8	33,2	41,8	44,3	40,7	35,1	29,6
$\alpha_{fb,6}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	2,3	8,7	19,7	31,4	41,9
	'20	'21	'22	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30
$\alpha_{fb,1}$	1,0	0,8	0,6	0,5	0,6	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3
$\alpha_{fb,2}$	3,2	2,6	2,1	1,6	1,3	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6	0,7
$\alpha_{fb,3}$	8,0	6,7	5,5	4,5	3,6	2,8	2,2	1,7	1,3	1,0	0,8
$\alpha_{fb,4}$	12,0	10,4	9,0	7,6	6,4	5,3	4,3	3,5	2,7	2,1	1,7
$\alpha_{fb,5}$	24,7	20,8	17,7	15,4	13,4	11,6	10,0	8,5	7,1	5,9	4,8
$\alpha_{fb,6}$	51,1	58,8	65,2	70,5	74,8	78,6	82,1	85,1	87,6	89,8	91,7

Tabelle A.6.: Modellparameter des Submoduls Flottenbestand.

Beschreibung	P	T	IW	U	Q
Verschrottungsrate 0	$\rho_{s,1}$	K	0,0113	%/a	[103]
Verschrottungsrate 1	$\rho_{s,2}$	K	0,0030	%/a	[103]
Verschrottungsrate 2	$\rho_{s,3}$	K	0,0032	%/a	[103]
Verschrottungsrate 3	$\rho_{s,4}$	K	0,0070	%/a	[103]
Verschrottungsrate 4	$\rho_{s,5}$	K	0,0067	%/a	[103]
Verschrottungsrate 5	$\rho_{s,6}$	K	0,0294	%/a	[103]
Initialwert Flottenbestand	FB_I	K	1.757	F	[40, 41, 100, 17]
Flottenbestand 0	FB_1	Z	293	F	[40, 41, 100, 17]
Flottenbestand 1	FB_2	Z	293	F	[40, 41, 100, 17]
Flottenbestand 2	FB_3	Z	293	F	[40, 41, 100, 17]
Flottenbestand 3	FB_4	Z	293	F	[40, 41, 100, 17]
Flottenbestand 4	FB_5	Z	293	F	[40, 41, 100, 17]
Flottenbestand 5	FB_6	Z	293	F	[40, 41, 100, 17]

Tabelle A.7.: Modellparameter des Submoduls Tourencharakteristika und Transportzeit.

Beschreibung	P	T	IW	U	Q
Transportdistanz pro Tour	d_T	K	63,4	km/F	[17]
Sendungen pro Tour	s_T	K	154,45	PE/F	[17]
Dropfaktor B2C/C2C	β_p	K	1,15	PE/St	[16]
Dropfaktor B2B	β_o	K	2,5	PE/St	[16]
Durchschnittliche Stoppdauer	\bar{t}_{st}	K	0,041667	h/St	[109]
Durchschnittsgeschwindigkeit	\bar{v}	K	24,1402	km/h	[111]

Tabelle A.8.: Modellparameter des Submoduls Transportkosten.

Beschreibung	P	T	IW	U	Q
Entwicklungsrate Kraftstoffpreis	ρ_{KP}	K	0,015522	%/a	[108]
Kraftstoffpreis	KP	Z	1,085	€/l	[108]
Entwicklungsrate Adbluepreis	ρ_{AP}	K	0,089226	%/a	[22]
Adbluepreis	AP	Z	0,151554	€/l	[173]
Entwicklungsrate Schmierstoffkosten	ρ_{SC}	K	0,041147	%/a	[22]
Schmierstoffkosten pro km	SC	Z	0,001840	€/km	[43, 22]
Reifenkilometer	R_{km}	K	62.500	km	[43]
Entwicklungsrate Reifenpreise	ρ_{RP}	K	0,013158	%/a	[22]
Reifenpreise	RP	Z	799,48	€	[43, 22]
Leistungsabschreibungsrate	ρ_{LA}	K	0,5	%	[173]
Restwert	rw	K	0,3	%	[32], [89]
Entwicklungsrate Kaufpreis	ρ_{LP}	K	0,007161	%/a	[22]
Kaufpreis für 1 LKW	LP	Z	37.158,16	€/F	[43, 22]
Entwicklungsrate Instandhaltung/Reparatur	ρ_{IR}	K	0,018778	%/a	[22]
Instandhaltung/Reparatur pro km	IR	Z	0,075966	€/km	[43, 22]
Kalkulatorischer Zinssatz	ρ_{KZ}	K	0,084	%/a	[43]
Zeitabschreibungsrate	ρ_{ZA}	K	0,5	%	[173]
Steuern/Versicherungen pro LKW	SV	Z	4.360	(€/F)/a	[43, 22]
Entwicklungsrate sonstige Kosten pro LKW	ρ_{SO}	K	0,005476	%/a	[22]
Sonstige Kosten pro LKW	SO	Z	5921,63	(€/F)/a	[43, 22]
Entwicklungsrate PK pro Fahrer	ρ_{PK}	K	0,022299	%/a	[22]
PK pro Fahrer	PK	Z	28.292,63	€/P	[173]
Personalfaktor pro LKW	β_{PF}	K	1,4	P/F	[173, 109]
Arbeitsstunden pro Tag	h_{AS}	K	8	h/d	

A. Parametrisierungsergebnisse

Tabelle A.9.: Modellparameter des Submoduls Ökologische Effekte der Güterverkehrsnachfrage.

Beschreibung	P	T	IW	U	Q
CO ₂ Konversionsfaktor - Diesel	$\beta_{1,D}$	K	2,628999	kg/l	[89]
CO ₂ Konversionsfaktor - Adblue	$\beta_{1,A}$	K	0,238	kg/l	[90]
HC+NO _x Konversionsfaktor LKW - EURO 1	$\beta_{g,2,1}$	K	1,450891	g/km	[71]
HC+NO _x Konversionsfaktor LKW - EURO 2	$\beta_{g,2,2}$	K	1,197844	g/km	[71]
HC+NO _x Konversionsfaktor LKW - EURO 3	$\beta_{g,2,3}$	K	1,035779	g/km	[71]
HC+NO _x Konversionsfaktor LKW - EURO 4	$\beta_{g,2,4}$	K	0,640148	g/km	[71]
HC+NO _x Konversionsfaktor LKW - EURO 5	$\beta_{g,2,5}$	K	0,572471	g/km	[71]
HC+NO _x Konversionsfaktor LKW - EURO 6	$\beta_{g,2,6}$	K	0,130832	g/km	[71]
CO Konversionsfaktor LKW - EURO 1	$\beta_{g,3,1}$	K	1,248039	g/km	[71]
CO Konversionsfaktor LKW - EURO 2	$\beta_{g,3,2}$	K	0,406718	g/km	[71]
CO Konversionsfaktor LKW - EURO 3	$\beta_{g,3,3}$	K	0,098182	g/km	[71]
CO Konversionsfaktor LKW - EURO 4	$\beta_{g,3,4}$	K	0,031676	g/km	[71]
CO Konversionsfaktor LKW - EURO 5	$\beta_{g,3,5}$	K	0,000444	g/km	[71]
CO Konversionsfaktor LKW - EURO 6	$\beta_{g,3,6}$	K	0,000444	g/km	[71]
PM ₁₀ Konversionsfaktor LKW - EURO 1	$\beta_{g,4,1}$	K	0,203993	g/km	[71]
PM ₁₀ Konversionsfaktor LKW - EURO 2	$\beta_{g,4,2}$	K	0,136913	g/km	[71]
PM ₁₀ Konversionsfaktor LKW - EURO 3	$\beta_{g,4,3}$	K	0,056583	g/km	[71]
PM ₁₀ Konversionsfaktor LKW - EURO 4	$\beta_{g,4,4}$	K	0,055114	g/km	[71]
PM ₁₀ Konversionsfaktor LKW - EURO 5	$\beta_{g,4,5}$	K	0,001392	g/km	[71]
PM ₁₀ Konversionsfaktor LKW - EURO 6	$\beta_{g,4,6}$	K	0,001392	g/km	[71]

Tabelle A.10.: Modellparameter der Szenarien.

Beschreibung	P	T	IW	U	Q
Packstationen					
Anzahl der Packstationen (PS)	PS	Z	147	PS	[35]
Entwicklungsrate PS	ρ_{PS}	K	0,016289	%/a	[35]
Kapazität pro PS	K_{PS}	Z	76	PE/PS	[35]
Entwicklungsrate der Kapazität pro PS	$\rho_{K,PS}$	K	0,030828	%/a	[35]
Aufbewahrungszeit des Pakets in einer PS	\bar{t}_{AZ}	K	4,5	d	[35]
Distanzabhängige Maut					
Distanzabhängiger Mautpreis pro km	DM	Z	0,081	€/km	[156]
Entwicklungsrate distanzabhängiger Mautpreis	ρ_{DM}	K	0,045293	%/a	[156]
Cordon-Maut					
Cordon-Maut pro Tag und Fahrzeug	CM	Z	6	€/F	[97]
Entwicklungsrate Cordon-Mautpreis	ρ_{CM}	K	0,045293	%/a	[156]

B. Kalibrierungsergebnisse

Tabelle B.1.: Kalibrierung des Submoduls Bevölkerung.

Beschreibung	P	MIN	MAX	OW	U
Fertilität 10–13	$\rho_{g,2}$	0,000000	0,000020	0,000019	%/a
Fertilität 14–19	$\rho_{g,3}$	0,005339	0,005877	0,005877	%/a
Fertilität 20–24	$\rho_{g,4}$	0,018877	0,023095	0,021013	%/a
Fertilität 25–29	$\rho_{g,5}$	0,032872	0,035749	0,035749	%/a
Fertilität 30–34	$\rho_{g,6}$	0,034094	0,045952	0,045952	%/a
Fertilität 35–39	$\rho_{g,7}$	0,018195	0,032875	0,032875	%/a
Fertilität 40–44	$\rho_{g,8}$	0,004056	0,008160	0,008160	%/a
Fertilität 45–49	$\rho_{g,9}$	0,000190	0,000413	0,000413	%/a
Fertilität 50–54	$\rho_{g,10}$	0,000004	0,000048	0,000048	%/a
Fertilität 55–59	$\rho_{g,11}$	0,000000	0,000028	0,000028	%/a
Mortalitätsrate 0–9	$\rho_{M,1}$	0,000392	0,000563	0,000527	%/a
Mortalitätsrate 10–13	$\rho_{M,2}$	0,000049	0,000145	0,000145	%/a
Mortalitätsrate 14–19	$\rho_{M,3}$	0,000146	0,000251	0,000236	%/a
Mortalitätsrate 20–24	$\rho_{M,4}$	0,000295	0,000430	0,000348	%/a
Mortalitätsrate 25–29	$\rho_{M,5}$	0,000311	0,000448	0,000311	%/a
Mortalitätsrate 30–34	$\rho_{M,6}$	0,000458	0,000636	0,000576	%/a
Mortalitätsrate 35–39	$\rho_{M,7}$	0,000670	0,001053	0,000858	%/a
Mortalitätsrate 40–44	$\rho_{M,8}$	0,001165	0,001658	0,001421	%/a
Mortalitätsrate 45–49	$\rho_{M,9}$	0,002215	0,002848	0,002220	%/a
Mortalitätsrate 50–54	$\rho_{M,10}$	0,004095	0,004766	0,004377	%/a
Mortalitätsrate 55–59	$\rho_{M,11}$	0,006398	0,006942	0,006867	%/a
Mortalitätsrate 60–64	$\rho_{M,12}$	0,009463	0,010303	0,010303	%/a
Mortalitätsrate 65–69	$\rho_{M,13}$	0,013979	0,015364	0,015364	%/a
Mortalitätsrate 70–74	$\rho_{M,14}$	0,021103	0,025567	0,021103	%/a
Mortalitätsrate 75–79	$\rho_{M,15}$	0,033828	0,039022	0,033828	%/a
Mortalitätsrate 80–84	$\rho_{M,16}$	0,059119	0,065505	0,065505	%/a
Mortalitätsrate 85–89	$\rho_{M,17}$	0,103707	0,114793	0,112547	%/a
Mortalitätsrate 90–94	$\rho_{M,18}$	0,171752	0,200322	0,200322	%/a
Mortalitätsrate ≥ 95	$\rho_{M,19}$	0,201687	0,324986	0,324986	%/a
Immigrationsrate 0–9	$\rho_{I,1}$	0,027873	0,047431	0,030812	%/a
Immigrationsrate 10–13	$\rho_{I,2}$	0,020890	0,041771	0,023394	%/a
Immigrationsrate 14–19	$\rho_{I,3}$	0,035510	0,075336	0,045799	%/a
Immigrationsrate 20–24	$\rho_{I,4}$	0,125514	0,181398	0,148214	%/a
Immigrationsrate 25–29	$\rho_{I,5}$	0,097496	0,139846	0,139846	%/a
Immigrationsrate 30–34	$\rho_{I,6}$	0,060145	0,087334	0,074908	%/a

B. Kalibrierungsergebnisse

Fortsetzung von Tabelle B.1

Beschreibung	P	MIN	MAX	OW	U
Immigrationsrate 35–39	$\rho_{I,7}$	0,033702	0,062548	0,044888	%/a
Immigrationsrate 40–44	$\rho_{I,8}$	0,023238	0,042479	0,028133	%/a
Immigrationsrate 45–49	$\rho_{I,9}$	0,020495	0,027564	0,023944	%/a
Immigrationsrate 50–54	$\rho_{I,10}$	0,015656	0,022280	0,019413	%/a
Immigrationsrate 55–59	$\rho_{I,11}$	0,011703	0,017212	0,012780	%/a
Immigrationsrate 60–64	$\rho_{I,12}$	0,008554	0,012159	0,011211	%/a
Immigrationsrate 65–69	$\rho_{I,13}$	0,007566	0,010707	0,007857	%/a
Immigrationsrate 70–74	$\rho_{I,14}$	0,005617	0,006908	0,006908	%/a
Immigrationsrate 75–79	$\rho_{I,15}$	0,005275	0,006770	0,006770	%/a
Immigrationsrate 80–84	$\rho_{I,16}$	0,007120	0,009581	0,007120	%/a
Immigrationsrate 85–89	$\rho_{I,17}$	0,009874	0,011784	0,009874	%/a
Immigrationsrate 90–94	$\rho_{I,18}$	0,008484	0,013986	0,011191	%/a
Immigrationsrate ≥ 95	$\rho_{I,19}$	0,005331	0,013336	0,006446	%/a
Emigrationsrate 0–9	$\rho_{E,1}$	0,032713	0,039302	0,036920	%/a
Emigrationsrate 10–13	$\rho_{E,2}$	0,021903	0,026742	0,026742	%/a
Emigrationsrate 14–19	$\rho_{E,3}$	0,025198	0,035451	0,035451	%/a
Emigrationsrate 20–24	$\rho_{E,4}$	0,069106	0,101904	0,091403	%/a
Emigrationsrate 25–29	$\rho_{E,5}$	0,072834	0,093726	0,079642	%/a
Emigrationsrate 30–34	$\rho_{E,6}$	0,060860	0,076963	0,076963	%/a
Emigrationsrate 35–39	$\rho_{E,7}$	0,039197	0,060367	0,060367	%/a
Emigrationsrate 40–44	$\rho_{E,8}$	0,028560	0,041565	0,041565	%/a
Emigrationsrate 45–49	$\rho_{E,9}$	0,023236	0,030466	0,025077	%/a
Emigrationsrate 50–54	$\rho_{E,10}$	0,018600	0,026881	0,026881	%/a
Emigrationsrate 55–59	$\rho_{E,11}$	0,015602	0,020576	0,020576	%/a
Emigrationsrate 60–64	$\rho_{E,12}$	0,011578	0,018639	0,018639	%/a
Emigrationsrate 65–69	$\rho_{E,13}$	0,008742	0,013179	0,013179	%/a
Emigrationsrate 70–74	$\rho_{E,14}$	0,006805	0,009885	0,006805	%/a
Emigrationsrate 75–79	$\rho_{E,15}$	0,007025	0,011926	0,007025	%/a
Emigrationsrate 80–84	$\rho_{E,16}$	0,008557	0,013511	0,013511	%/a
Emigrationsrate 85–89	$\rho_{E,17}$	0,013121	0,018080	0,018080	%/a
Emigrationsrate 90–94	$\rho_{E,18}$	0,016776	0,027139	0,027139	%/a
Emigrationsrate ≥ 95	$\rho_{E,19}$	0,014307	0,031319	0,031320	%/a

Tabelle B.2.: Ergebnisse der Kalibrierung zum Submodul Bevölkerung.

P	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<i>B₁</i>							
R	287.290	292.983	296.139	304.139	312.432	322.577	335.310
S	287.290	291.737	296.056	300.234	304.260	308.124	311.824
D	0,0000	-0,0043	-0,0003	-0,0128	-0,0262	-0,0448	-0,0700
O	287.290	294.626	301.460	307.853	313.842	319.448	324.682
D	0,0000	0,0056	0,0180	0,0122	0,0045	-0,0097	-0,0317
<i>B₂</i>							
R	105.146	106.517	104.909	105.669	106.687	108.593	111.755
S	105.146	107.699	110.075	112.303	114.401	116.385	118.266
D	0,0000	0,0111	0,0492	0,0628	0,0723	0,0718	0,0583
O	105.146	107.122	109.328	111.656	114.030	116.400	118.728
D	0,0000	0,0057	0,0421	0,0567	0,0688	0,0719	0,0624
<i>B₃</i>							
R	167.968	160.896	154.832	157.574	160.382	164.623	168.893
S	167.968	169.852	172.057	174.500	177.117	179.852	182.665
D	0,0000	0,0557	0,1112	0,1074	0,1043	0,0925	0,0815
O	167.968	167.583	167.752	168.444	169.605	171.175	173.087
D	0,0000	0,0416	0,0834	0,0690	0,0575	0,0398	0,0248
<i>B₄</i>							
R	231.857	234.412	217.490	213.419	206.180	197.803	190.476
S	231.857	227.699	224.438	221.998	220.300	219.266	218.822
D	0,0000	-0,0286	0,0319	0,0402	0,0685	0,1085	0,1488
O	231.857	224.236	217.731	212.261	207.755	204.141	201.352
D	0,0000	-0,0434	0,0011	-0,0054	0,0076	0,0320	0,0571
<i>B₅</i>							
R	274.795	277.014	267.615	278.367	289.290	298.261	304.968
S	274.795	277.193	278.469	278.975	278.989	278.729	278.365
D	0,0000	0,0006	0,0406	0,0022	-0,0356	-0,0655	-0,0872
O	274.795	281.992	286.485	288.920	289.828	289.647	288.729
D	0,0000	0,0180	0,0705	0,0379	0,0019	-0,0289	-0,0532
<i>B₆</i>							
R	253.967	264.829	257.556	270.202	281.161	290.287	298.016
S	253.967	261.349	267.749	273.162	277.647	281.299	284.232
D	0,0000	-0,0131	0,0396	0,0110	-0,0125	-0,0310	-0,0463
O	253.967	260.890	267.939	274.516	280.280	285.071	288.856
D	0,0000	-0,0149	0,0403	0,0160	-0,0031	-0,0180	-0,0307

B. Kalibrierungsergebnisse

Fortsetzung von Tabelle B.2							
P	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<i>B₇</i>							
R	240.344	233.584	214.929	221.255	230.752	241.704	255.342
S	240.344	243.433	247.223	251.399	255.713	259.974	264.048
D	0,0000	0,0422	0,1503	0,1362	0,1082	0,0756	0,0341
O	240.344	239.794	240.741	242.893	245.899	249.414	253.135
D	0,0000	0,0266	0,1201	0,0978	0,0656	0,0319	-0,0086
<i>B₈</i>							
R	292.081	279.237	250.666	241.085	230.008	223.050	219.510
S	292.081	281.807	274.097	268.567	264.855	262.629	261.585
D	0,0000	0,0092	0,0935	0,1140	0,1515	0,1774	0,1917
O	292.081	277.478	265.860	256.891	250.245	245.599	242.629
D	0,0000	-0,0063	0,0606	0,0656	0,0880	0,1011	0,1053
<i>B₉</i>							
R	298.933	304.394	284.718	282.225	276.806	268.679	259.552
S	298.933	295.316	290.744	285.829	281.000	276.544	272.632
D	0,0000	-0,0298	0,0212	0,0128	0,0152	0,0293	0,0504
O	298.933	295.893	290.592	284.077	277.114	270.254	263.868
D	0,0000	-0,0279	0,0206	0,0066	0,0011	0,0059	0,0166
<i>B₁₀</i>							
R	235.410	242.665	238.900	250.719	263.731	272.788	278.740
S	235.410	245.274	252.510	257.500	260.650	262.352	262.966
D	0,0000	0,0108	0,0570	0,0270	-0,0117	-0,0383	-0,0566
O	235.410	245.683	253.199	258.083	260.646	261.284	260.421
D	0,0000	0,0124	0,0599	0,0294	-0,0117	-0,0422	-0,0657
<i>B₁₁</i>							
R	218.274	214.910	205.290	206.835	210.000	215.911	223.288
S	218.274	220.496	223.840	227.647	231.458	234.974	238.021
D	0,0000	0,0260	0,0904	0,1006	0,1022	0,0883	0,0660
O	218.274	218.583	220.857	224.135	227.684	230.989	233.719
D	0,0000	0,0171	0,0758	0,0836	0,0842	0,0698	0,0467
<i>B₁₂</i>							
R	178.010	188.202	192.402	196.320	198.790	198.484	196.046
S	178.010	183.395	188.259	192.841	197.233	201.444	205.436
D	0,0000	-0,0255	-0,0215	-0,0177	-0,0078	0,0149	0,0479
O	178.010	182.898	186.800	190.314	193.721	197.098	200.403
D	0,0000	-0,0282	-0,0291	-0,0306	-0,0255	-0,0070	0,0222

Fortsetzung von Tabelle B.2

P	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<i>B₁₃</i>							
R	220.696	203.273	175.289	167.624	160.457	158.810	168.334
S	220.696	210.214	202.701	197.508	194.141	192.209	191.396
D	0,0000	0,0341	0,1564	0,1783	0,2099	0,2103	0,1370
O	220.696	207.875	198.791	192.440	188.155	185.468	184.026
D	0,0000	0,0226	0,1341	0,1480	0,1726	0,1679	0,0932
<i>B₁₄</i>							
R	185.009	193.102	196.864	197.706	198.524	194.591	179.157
S	185.009	186.613	186.300	184.924	183.067	181.115	179.314
D	0,0000	-0,0336	-0,0537	-0,0647	-0,0779	-0,0693	0,0009
O	185.009	188.125	188.055	186.220	183.540	180.601	177.773
D	0,0000	-0,0258	-0,0447	-0,0581	-0,0755	-0,0719	-0,0077
<i>B₁₅</i>							
R	109.297	118.014	125.458	137.303	149.246	156.585	163.957
S	109.297	119.380	127.442	133.650	138.261	141.563	143.837
D	0,0000	0,0116	0,0158	-0,0266	-0,0736	-0,0959	-0,1227
O	109.297	120.682	130.090	137.346	142.594	146.124	148.277
D	0,0000	0,0226	0,0369	0,0003	-0,0446	-0,0668	-0,0956
<i>B₁₆</i>							
R	75.346	76.997	76.010	76.431	76.787	83.571	91.063
S	75.346	78.059	81.715	85.764	89.819	93.628	97.047
D	0,0000	0,0138	0,0751	0,1221	0,1697	0,1203	0,0657
O	75.346	77.057	80.528	84.922	89.586	94.063	98.069
D	0,0000	0,0008	0,0594	0,1111	0,1667	0,1255	0,0769
<i>B₁₇</i>							
R	44.026	43.652	42.940	43.740	45.882	48.107	49.384
S	44.026	45.352	46.875	48.650	50.641	52.770	54.948
D	0,0000	0,0390	0,0916	0,1123	0,1037	0,0969	0,1127
O	44.026	44.954	45.924	47.250	48.999	51.095	53.400
D	0,0000	0,0298	0,0695	0,0803	0,0679	0,0621	0,0813
<i>B₁₈</i>							
R	14.297	16.678	18.089	19.394	19.765	19.994	20.249
S	14.297	16.723	18.627	20.202	21.585	22.861	24.077
D	0,0000	0,0027	0,0297	0,0417	0,0921	0,1434	0,1890
O	14.297	16.706	18.379	19.599	20.597	21.531	22.484
D	0,0000	0,0017	0,0161	0,0106	0,0421	0,0769	0,1104

B. Kalibrierungsergebnisse

Fortsetzung von Tabelle B.2

P	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<i>B₁₉</i>							
R	9.929	9.366	5.906	5.215	4.949	5.431	5.991
S	9.929	9.878	10.148	10.602	11.163	11.785	12.441
D	0,0000	0,0547	0,7182	1,0331	1,2557	1,1699	1,0767
O	9.929	8.696	8.272	8.259	8.442	8.717	9.042
D	0,0000	-0,0715	0,4007	0,5837	0,7057	0,6050	0,5093

Tabelle B.3.: Kalibrierung des Submoduls Güternachfrage.

Beschreibung	P	MIN	MAX	OW	U
Entwicklungsrate der Güternachfrage pro Privatkunde	$\rho_{GNK,p}$	0,000000	0,095588	0,083416	%/a
Entwicklungsrate der Güternachfrage pro Mio. € BIP	$\rho_{GNK,o}$	-0,001828	0,026465	0,009821	%/a
Entwicklungsrate BIP	ρ_{BIP}	0,000000	0,054465	0,036054	%/a

Tabelle B.4.: Ergebnisse der Kalibrierung des Submoduls Güternachfrage.

P	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<i>GNK_p</i>							
R	8,7746	9,3739	10,2540	11,0866	12,2584	13,0000	14,2381
S	8,7746	9,4994	10,2841	11,1337	12,0534	13,0491	14,1270
D	0,0000	0,0134	0,0029	0,0042	-0,0167	0,0038	-0,0078
O	8,7746	9,5065	10,2995	11,1587	12,0895	13,0979	14,1905
D	0,0000	0,0142	0,0044	0,0065	-0,0138	0,0075	-0,0033
<i>GNK_o</i>							
R	529	543	547	546	547	555	559
S	529,00	534,42	539,89	545,42	551,00	556,65	562,35
D	0,0000	-0,0158	-0,0130	-0,0011	0,0073	0,0030	0,0060
O	529,00	534,20	539,44	544,74	550,09	555,49	560,95
D	0,0000	-0,0162	-0,0138	-0,0023	0,0056	0,0009	0,0035
<i>BIP</i>							
R	99.267	103.292	108.143	109.824	112.797	117.748	124.161
S	99.267	103.195	107.279	111.524	115.937	120.525	125.294
D	0,0000	-0,0009	-0,0080	0,0155	0,0278	0,0236	0,0091
O	99.267	102.846	106.554	110.396	114.376	118.499	122.772
D	0,0000	-0,0043	-0,0147	0,0052	0,0140	0,0064	-0,0112

B. Kalibrierungsergebnisse

Tabelle B.5.: Kalibrierung des Submoduls Transportkosten.

Beschreibung	P	MIN	MAX	OW	U
Entwicklungsrate Kraftstoffpreis	ρ_{KP}	-0,132840	0,158367	0,046409	%/a
Entwicklungsrate Adbluepreis	ρ_{AP}	-0,133974	0,434514	0,117727	%/a
Entwicklungsrate Schmierstoffkosten	ρ_{SC}	-0,042512	0,166861	0,065394	%/a
Entwicklungsrate Reifenpreise	ρ_{RP}	0,000000	0,016833	0,015561	%/a
Entwicklungsrate Kaufpreis	ρ_{LP}	0,000000	0,018330	0,010020	%/a
Entwicklungsrate Instandhaltung/Reparatur	ρ_{IR}	0,000000	0,027644	0,020997	%/a
Entwicklungsrate sonstige Kosten pro LKW	ρ_{SO}	-0,016135	0,044386	0,012882	%/a
Entwicklungsrate PK pro Fahrer	ρ_{PK}	0,000000	0,045000	0,023494	%/a

Tabelle B.6.: Ergebnisse der Kalibrierung zum Submodul Transportkosten.

P	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<i>KP</i>							
R	1,0850	1,2250	1,4190	1,4890	1,4280	1,3505	1,1711
S	1,0850	1,1023	1,1199	1,1377	1,1559	1,1743	1,1930
D	0,0000	-0,1002	-0,2108	-0,2359	-0,1906	-0,1305	0,0187
O	1,0850	1,1354	1,1880	1,2432	1,3009	1,3612	1,4244
D	0,0000	-0,0732	-0,1628	-0,1651	-0,0890	0,0080	0,2163
<i>AP</i>							
R	0,1516	0,2174	0,2848	0,2890	0,2503	0,2449	0,2500
S	0,1516	0,1660	0,1818	0,1991	0,2180	0,2388	0,2615
D	0,0000	-0,2365	-0,3617	-0,3111	-0,1289	-0,0250	0,0461
O	0,1516	0,1694	0,1893	0,2116	0,2365	0,2644	0,2955
D	0,0000	-0,2208	-0,3352	-0,2677	-0,0549	0,0796	0,1821
<i>SC</i>							
R	0,0018	0,0021	0,0024	0,0025	0,0025	0,0025	0,0024
S	0,0018	0,0019	0,0020	0,0021	0,0022	0,0023	0,0024
D	0,0000	-0,1063	-0,1795	-0,1722	-0,1273	-0,0945	-0,0138
O	0,0018	0,0020	0,0021	0,0022	0,0024	0,0025	0,0027
D	0,0000	-0,0870	-0,1436	-0,1172	-0,0493	0,0078	0,1214
<i>RP</i>							
R	799	811	824	838	852	864	876
S	799	810	821	832	844	855	866
D	0,0000	-0,0015	-0,0035	-0,0067	-0,0099	-0,0104	-0,0109
O	799	812	825	837	850	864	877
D	0,0000	0,0006	0,0006	-0,0006	-0,0018	-0,0003	0,0012

Fortsetzung von Tabelle B.6							
P	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<i>LP</i>							
R	37.158	37.839	38.392	38.667	38.783	38.978	39.056
S	37.158	37.430	37.705	37.981	38.259	38.539	38.822
D	0,0000	-0,0108	-0,0179	-0,0177	-0,0135	-0,0113	-0,0060
O	37.158	37.531	37.907	38.286	38.670	39.057	39.449
D	0,0000	-0,0082	-0,0126	-0,0098	-0,0029	0,0020	0,0101
<i>IR</i>							
R	0,0760	0,0764	0,0783	0,0805	0,0824	0,0847	0,0865
S	0,0760	0,0774	0,0789	0,0805	0,0820	0,0836	0,0852
D	0,0000	0,0137	0,0076	0,0000	-0,0046	-0,0127	-0,0149
O	0,0760	0,0776	0,0792	0,0809	0,0825	0,0843	0,0861
D	0,0000	0,0154	0,0109	0,0050	0,0020	-0,0045	-0,0052
<i>SO</i>							
R	5.921,6	6.184,5	6.341,7	6.406,5	6.343,7	6.243,8	6.143,0
S	5.921,6	5.954,8	5.988,1	6.021,6	6.055,3	6.089,2	6.123,3
D	0,0000	-0,0371	-0,0558	-0,0601	-0,0455	-0,0248	-0,0032
O	5.921,6	5.997,9	6.075,2	6.153,4	6.232,7	6.313,0	6.394,3
D	0,0000	-0,0302	-0,0420	-0,0395	-0,0175	0,0111	0,0409
<i>PK</i>							
R	28.293	28.980	29.415	30.033	30.897	31.577	32.998
S	28.293	28.943	29.608	30.289	30.985	31.697	32.426
D	0,0000	-0,0013	0,0066	0,0085	0,0028	0,0038	-0,0173
O	28.293	28.957	29.638	30.334	31.047	31.776	32.523
D	0,0000	-0,0008	0,0076	0,0100	0,0048	0,0063	-0,0144

Tabelle B.7.: Kalibrierung des Submoduls Ökologische Effekte.

Beschreibung	P	MIN	MAX	OW	U
HC+NO _x Konversionsfaktor LKW - EURO 5	$\beta_{g,2,5}$	0,0000	0,572471	0,572471	g/km
HC+NO _x Konversionsfaktor LKW - EURO 6	$\beta_{g,2,6}$	0,0000	0,204105	0,109492	g/km
CO Konversionsfaktor LKW - EURO 5	$\beta_{g,3,5}$	0,0000	0,000444	0,000444	g/km
CO Konversionsfaktor LKW - EURO 6	$\beta_{g,3,6}$	0,0000	0,000444	0,000444	g/km
PM ₁₀ Konversionsfaktor LKW - EURO 5	$\beta_{g,4,5}$	0,0000	0,001392	0,001392	g/km
PM ₁₀ Konversionsfaktor LKW - EURO 6	$\beta_{g,4,6}$	0,0000	0,001392	0,001392	g/km

Tabelle B.8.: Ergebnisse der Kalibrierung zum Submodul Ökologische Effekte.

P	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
$\beta_{g,2}$											
R	1,0441	0,9805	0,9267	0,8740	0,8270	0,7849	0,7439	0,6923	0,6276	0,5343	0,4678
S	1,0441	0,9804	0,9265	0,8739	0,8268	0,7845	0,7420	0,6856	0,6126	0,5408	0,4766
D	0,0000	-0,0001	-0,0001	-0,0002	-0,0002	-0,0006	-0,0026	-0,0097	-0,0239	0,0120	0,0188
O	1,0441	0,9804	0,9265	0,8739	0,8268	0,7844	0,7416	0,6838	0,6084	0,5340	0,4677
D	0,0000	-0,0001	-0,0001	-0,0002	-0,0002	-0,0006	-0,0032	-0,0124	-0,0306	-0,0005	-0,0003
$\beta_{g,2}$	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
R	0,4100	0,3611	0,3202	0,2862	0,2596	0,2375	0,2156	0,1976	0,1827	0,1706	0,1592
S	0,4209	0,3738	0,3344	0,3016	0,2761	0,2548	0,2338	0,2164	0,2022	0,1906	0,1796
D	0,0266	0,0351	0,0443	0,0539	0,0635	0,0732	0,0841	0,0955	0,1066	0,1173	0,1284
O	0,4100	0,3613	0,3205	0,2866	0,2602	0,2381	0,2163	0,1983	0,1835	0,1714	0,1601
D	0,0000	0,0004	0,0008	0,0013	0,0020	0,0025	0,0029	0,0036	0,0043	0,0050	0,0055
$\beta_{g,3}$											
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
R	0,2780	0,2379	0,2039	0,1731	0,1455	0,1216	0,1012	0,0838	0,0689	0,0564	0,0460
S	0,2780	0,2378	0,2039	0,1730	0,1454	0,1215	0,1011	0,0837	0,0688	0,0563	0,0459
D	0,0000	-0,0002	-0,0003	-0,0005	-0,0007	-0,0010	-0,0012	-0,0014	-0,0017	-0,0019	-0,0022
O	0,2780	0,2378	0,2039	0,1730	0,1454	0,1215	0,1011	0,0837	0,0688	0,0563	0,0459
D	0,0000	-0,0002	-0,0003	-0,0005	-0,0007	-0,0010	-0,0012	-0,0014	-0,0017	-0,0019	-0,0022
$\beta_{g,3}$	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
R	0,0374	0,0304	0,0246	0,0201	0,0188	0,0184	0,0151	0,0132	0,0121	0,0114	0,0087
S	0,0373	0,0303	0,0246	0,0200	0,0188	0,0184	0,0151	0,0132	0,0121	0,0114	0,0087
D	-0,0025	-0,0027	-0,0030	-0,0031	-0,0010	-0,0003	-0,0036	-0,0025	-0,0018	-0,0011	-0,0064
O	0,0373	0,0303	0,0246	0,0200	0,0188	0,0184	0,0151	0,0132	0,0121	0,0114	0,0087
D	-0,0025	-0,0027	-0,0030	-0,0031	-0,0010	-0,0003	-0,0036	-0,0025	-0,0018	-0,0011	-0,0064

Fortsetzung von Tabelle B.8

P	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
$\beta_{g,4}$											
R	0,0903	0,0844	0,0787	0,0706	0,0606	0,0515	0,0434	0,0366	0,0308	0,0260	0,0220
S	0,0903	0,0844	0,0787	0,0705	0,0605	0,0515	0,0434	0,0366	0,0308	0,0260	0,0220
D	0,0000	-0,0001	-0,0001	-0,0003	-0,0006	-0,0009	-0,0011	-0,0013	-0,0015	-0,0016	-0,0018
O	0,0903	0,0844	0,0787	0,0705	0,0605	0,0515	0,0434	0,0366	0,0308	0,0260	0,0220
D	0,0000	-0,0001	-0,0001	-0,0003	-0,0006	-0,0009	-0,0011	-0,0013	-0,0015	-0,0016	-0,0018
$\beta_{g,4}$	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
R	0,0186	0,0158	0,0133	0,0112	0,0098	0,0087	0,0073	0,0063	0,0056	0,0050	0,0043
S	0,0186	0,0157	0,0133	0,0111	0,0097	0,0087	0,0073	0,0063	0,0056	0,0050	0,0043
D	-0,0019	-0,0021	-0,0024	-0,0026	-0,0021	-0,0020	-0,0031	-0,0028	-0,0025	-0,0021	-0,0032
O	0,0186	0,0157	0,0133	0,0111	0,0097	0,0087	0,0073	0,0063	0,0056	0,0050	0,0043
D	-0,0019	-0,0021	-0,0024	-0,0026	-0,0021	-0,0020	-0,0031	-0,0028	-0,0025	-0,0021	-0,0032

B. Kalibrierungsergebnisse

Tabelle B.9.: Kalibrierung der Szenarien.

Beschreibung	P	MIN	MAX	OW	U
Entwicklungsrate Packstationen	ρ_{PS}	0,000000	0,060000	0,016546	%/a
Entwicklungsrate Kapazität pro Packstation	$\rho_{K,PS}$	0,000000	0,084906	0,033950	%/a
Entwicklungsrate distanzabhängiger Mautpreis	ρ_{DM}	-0,113475	0,410000	0,036960	%/a
Entwicklungsrate Cordon-Mautpreis	ρ_{CM}	-0,113475	0,410000	0,036960	%/a

Tabelle B.10.: Ergebnisse der Kalibrierung der Szenarien.

P	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<i>PS</i>							
R	147	147	147	156	156	162	162
S	147,000	149,395	151,828	154,301	156,815	159,369	161,965
D	0,0000	0,0163	0,0328	-0,0109	0,0052	-0,0162	-0,0002
O	147,000	149,432	151,905	154,418	156,973	159,571	162,211
D	0,0000	0,0165	0,0334	-0,0101	0,0062	-0,0150	0,0013
<i>K_{PS}</i>							
R	76	80	80	86,8	86,8	90,9	90,9
S	76,0000	78,3429	80,7581	83,2477	85,8140	88,4595	91,1866
D	0,0000	-0,0207	0,0095	-0,0409	-0,0114	-0,0268	0,0032
O	76,0000	78,5802	81,2480	84,0063	86,8584	89,8072	92,8561
D	0,0000	-0,0177	0,0156	-0,0322	0,0007	-0,0120	0,0215
<i>DM</i>							
R	0,0810	0,0810	0,0810	0,0810	0,0810	0,1142	0,1013
S	0,0810	0,0847	0,0885	0,0925	0,0967	0,1011	0,1057
D	0,0000	0,0453	0,0926	0,1421	0,1939	-0,1149	0,0436
O	0,0810	0,0840	0,0871	0,0903	0,0937	0,0971	0,1007
D	0,0000	0,0370	0,0753	0,1150	0,1562	-0,1497	-0,0054
<i>CM</i>							
R	6	6	6	6	6	8,46	7,5
S	6,0000	6,2718	6,5558	6,8528	7,1631	7,4876	7,8267
D	0,0000	0,0453	0,0926	0,1421	0,1939	-0,1149	0,0436
O	6,0000	6,2218	6,4517	6,6902	6,9374	7,1938	7,4597
D	0,0000	0,0370	0,0753	0,1150	0,1562	-0,1497	-0,0054